

26 & 27
novembre
2019

Synthèse
multimédia

4^{es} RENCONTRES NATIONALES
de la
recherche
sur les
sites & sols
pollués



ADEME



Agence de l'Environnement
et de la Maîtrise de l'Energie



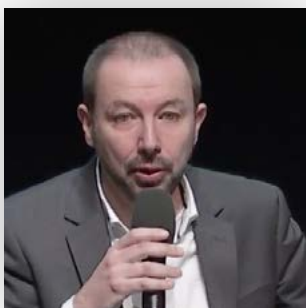
MINISTÈRE
DE LA TRANSITION
ÉCOLOGIQUE
ET SOLIDAIRE

MINISTÈRE
DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR,
DE LA RECHERCHE
ET DE L'INNOVATION



LES PLÉNIÈRES

animées par
Valéry DUBOIS
Journaliste



Ce document est édité par l'ADEME

ADEME

20, avenue du Grésillé
BP 90406 | 49004 Angers Cedex 01

Coordination technique : Frédérique Cadière et Hélène Roussel, Service Friches Urbaines et Sites Pollués

Coordination éditoriale : Sylvie Guyader, Service mobilisation des professionnels

Rédaction : présidents des ateliers des 4^{es} rencontres nationales de la recherche sur les sites et sols pollués, ADEME et Terre21

Credits photos et vidéos : Mstream/ADEME sauf mentions spécifiques

Maquettage : Terre 21

Dessins : Loïc Schvartz

Document réf. 011060 téléchargeable sur
<https://www.rencontres-recherche-ssp2019.ademe.fr/apres-l-evenement.htm>

EAN numérique : 9791029715105

Dépôt légal : ©ADEME Éditions, février 2020

Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite selon le Code de la propriété intellectuelle (Art L 122-4) et constitue une contrefaçon réprimée par le Code pénal. Seules sont autorisées (Art L 122-5) les copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective, ainsi que les analyses et courtes citations justifiées par le caractère critique, pédagogique ou d'information de l'œuvre à laquelle elles sont incorporées, sous réserve, toutefois, du respect des dispositions des articles L 122-10 à L 122-12 du même Code, relatives à la reproduction par reprographie.

3 Ouverture des 4^{es} rencontres

Marie-Christine PREMARTIN, Directrice exécutive de l'expertise et des programmes, ADEME

5 Réparer la planète, une nouvelle utopie ?

Philippe BIHOUIX, Ingénieur, auteur de *Le bonheur était pour demain* (Seuil, 2019)

7 Impacts sanitaires et sociaux des sites contaminés

Philippe HUBERT, Directeur des risques chroniques à l'INERIS

Marco MARTUZZI, Programme Manager, Environment and Health Impact Assessment à l'organisation mondiale de la santé (OMS)

9 Prise en compte des incertitudes dans la gestion des sites et sols pollués

Dominique GUYONNET, Directeur de programme scientifique, BRGM

11 La recherche et l'innovation sur les sites et sols pollués

Frédérique CADIÈRE, Correspondante recherche ADEME

Jean-Marie CÔME, Directeur R&D Ginger-Burgeap et membre de l'UPDS

Nathalie GUISEIX, Présidente d'Innovasol et référente sites et sols pollués Renault

14 Synthèse des principales pistes de recherche

20 LES ATELIERS THÉMATIQUES

44 Clôture des rencontres

José CAIRE, Directeur villes et territoires durables, ADEME

Nathalie GUISEIX, Présidente d'Innovasol et référente sites et sols pollués Renault





Ouverture des 4^{es} rencontres

Marie-Christine PRÉMARTIN

Directrice exécutive de l'expertise et des programmes, ADEME

“Les sols ne sont pas une ressource renouvelable”

Ces journées qui ne surviennent que tous les quatre ans sont importantes car elles structurent la recherche dans le secteur pour les années à venir. C'est une chance collective pour donner des orientations sur la recherche et pour tester les résultats dans nos activités en tant que maître d'ouvrage. Ces journées promettent d'être riches en échanges et en propositions. Elles réunissent déjà des bureaux d'études (20%), des chercheurs (30%), des entreprises privées spécialisées dans la dépollution des sols et la reconquête des territoires (30%), des services de l'État, des membres de collectivités et des associations.

Ces rencontres sont l'occasion de procéder à un état d'avancement, quatre ans après la précédente édition : quels ont été les éléments marquants ou manquants durant cette période ? Quelles sont aujourd'hui les attentes et les besoins en matière de recherche et d'innovation ? Quelles perspectives et quelles orientations pouvons-nous tracer pour la suite ?

À travers ces ateliers, 150 résultats de recherche seront présentés auxquels s'ajouteront des séquences participatives inédites pour favoriser les interactions. Il s'agira notamment de réfléchir à l'amélioration de la prise en compte des incertitudes dans nos prises de décision. Ainsi nous nous pencherons sur les différentes informations techniques, analytiques ou socioculturelles nécessaires pour déterminer

l'usage d'un site, la représentativité des données ou le niveau de confiance à accorder à ces données. Ce travail collectif permettra à la communauté des sites et sols pollués (SSP) de mieux s'imprégner de la culture de l'incertitude.

Les sols constituent une ressource essentielle et stratégique pour satisfaire les besoins de l'humanité. Les services écosystémiques fournis par le sol comme le stockage du carbone, le recyclage de l'eau, la préservation de la biodiversité biologique sont précieux. C'est pourquoi il faut sensibiliser le grand public et les décideurs sur le fait que les sols ne sont pas une ressource renouvelable. Produire un sol de qualité nécessite du temps, restaurer un sol pollué peut demander des centaines d'années. La meilleure façon de disposer d'un sol de qualité étant encore de le préserver, tous les moyens doivent être mis en œuvre pour la protection et la reconstitution des sols.

Deux siècles d'industrialisation ont laissé de nombreuses traces de pollution des sols. Les hydrocarbures, les métaux, les produits phytosanitaires, les microplastiques sont autant de polluants qui mettent en péril la qualité de la ressource en eau, de la chaîne alimentaire et des terres agricoles.

Par ailleurs, le gouvernement s'est engagé dans un programme « zéro artificialisation nette » qui implique de reconvertir des sites et des friches pollués. Dans cette perspective de lutte



contre l'étalement urbain, l'ADEME a pour mission d'intervenir en tant que maître d'ouvrage sur la mise en sécurité des SSP orphelins pour le compte du Ministère de la Transition énergétique et solidaire (MTES). Cette activité couvre 200 sites et correspond à un budget de 20 millions d'EUR. L'ADEME soutient également les opérations de reconversion des sites et friches pollués. Entre 2010 et 2019, elle a ainsi aidé 130 opérations pour un budget de 54 millions d'EUR. Ces réhabilitations de sites pollués devenaient par exemple des projets de renouvellement urbain, des supports d'énergie renouvelable, (centrale photovoltaïque). Elles pouvaient aussi servir à produire des matériaux bio-sourcés, à lutter contre les îlots de chaleur ou être l'objet de solutions de renaturation pour restaurer la biodiversité. Dans ce cadre, l'édition 2020 de l'appel à projet sur les « Travaux de dépollution pour la reconversion des friches polluées » est ouvert jusqu'au 02 avril 2020, avec une dotation de 4 millions d'EUR.

L'ADEME apporte son soutien à la recherche dans le développement des connaissances sur la pollution des sols et de ses impacts sur l'homme et les écosystèmes, sur l'amélioration des modes de gestion des techniques de traitement, sur l'aide à la reconversion. L'appel à projet sur la gestion des sites pollués (GESIPOL) initié en 2013 a financé 29 projets qui répondent aux besoins du marché et qui facilitent le transfert des innovations dans les pratiques de gestion. Au delà du soutien à

la recherche, il est essentiel de travailler à la diffusion des connaissances et des résultats vers les professionnels. Suite à la précédente édition de ces rencontres, est né le réseau national d'Échange sur les Sites et Sols pollués pour la Recherche et le Transfert (ESSORT) qui, en complément des rencontres nationales de la recherche en SSP, organise régulièrement des journées dédiées (outils diagnostics en 2017, traitement des polluants en 2018).

En réalisant le bilan de son action en matière de SSP, l'ADEME comptabilise 180 actions financées sur 7 ans, pour plus de 25 millions d'EUR. Ces travaux ont permis d'améliorer la connaissance et de la diffuser sous forme de guides techniques, de bases de données, de recommandations aux décideurs, d'outils d'aide à la décision. Ces résultats destinés à être testés et utilisés par l'ensemble des acteurs se révèlent d'autant plus précieux lorsqu'ils figurent ensuite dans la méthodologie nationale de gestion des sites pollués. Parmi les études remarquables peuvent être citées : l'étude sur les bio-indicateurs, la prise en compte de la bio-accessibilité orale dans les gestions de risques sanitaires, l'utilisation de la géophysique pour des investigations non invasives. Le soutien peut aussi prendre la forme de créations d'entreprises. C'est ainsi que deux entreprises issues du programme « bio-indicateurs » ont vu le jour : Elisol environnement et LEB Aquitaine Transfert.

L'ADEME remercie l'ensemble des partenaires, tous les présidents des ateliers, le comité scientifique ainsi que l'ensemble des auteurs qui vont présenter leurs travaux.

“L'ADEME comptabilise 180 actions financées sur 7 ans, pour plus de 25 millions d'EUR”



@Ademe Normandie

Réhabilitation de site pollué en Normandie

Réparer la planète, une nouvelle utopie ?



 **Morceaux choisis**

Philippe BIHOUIX

Ingénieur, auteur de *Le bonheur était pour demain*
(Seuil, 2019)

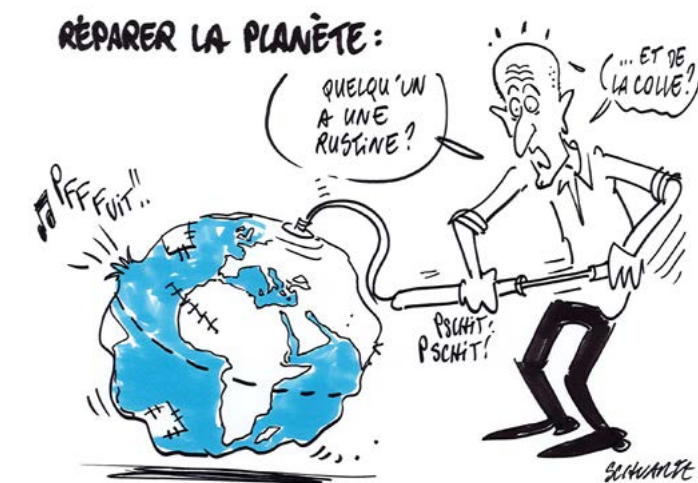
**“Il faut savoir faire preuve de
techno-discernement pour orienter le
génie humain sur les bons sujets”**

Les ressources sont extraites du sous-sol de plus en plus rapidement. Pendant les vingt ou trente prochaines années, davantage de matériaux seront sortis du sol que durant toute l'histoire de l'humanité. Il convient de s'interroger si cette accélération, qui concerne presque tous les minerais, peut se poursuivre encore longtemps. La problématique est la même pour les sols : tous les sept à dix ans, l'équivalent d'un département français est artificialisé. À ce rythme, d'ici 700 à 800 ans, la France ressemblera à une planète de science-fiction totalement bétonnée. Les pratiques agricoles répondent aux mêmes enjeux. Sachant qu'en moyenne, un kilogramme de nourriture entraîne l'érosion d'un kilogramme de sol et que cet impact est quatre fois plus important dans les sols tropicaux, la soutenabilité de l'agriculture telle qu'elle est pratiquée de nos jours questionne. L'aggravation de la pollution de l'air, des sols, des eaux et de la mer forme une autre limite à laquelle vient se heurter notre modèle de consommation. Le tiers de la pollution par les micro-plastiques est imputable à l'usure des pneus et de la peinture sur les routes. Les voitures 4X4 avec leurs pneus larges sont donc un facteur aggravant de ce type de pollution. Les français ont tendance à croire que nous vivons dans une société tertiaire, de plus en plus dématérialisée. En réalité, le monde n'a jamais été aussi industriel qu'aujourd'hui, car les produits que nous consommons sont pour une large

part importés grâce au développement de la conteneurisation. De fait, nous créons de la pollution ailleurs dans le monde via nos achats.

L'intitulé de la présente intervention : « Réparer la planète : une nouvelle utopie », reflète cette tendance de la société à accepter de polluer d'autant plus facilement que des techniques de dépollution existent. Il y a une dissonance cognitive entre la dégradation de l'état du monde et les trois promesses pour le futur. La promesse cornucopienne vante les vertus d'une technologie toujours plus poussée, qui nous permettrait d'aller plus haut, plus loin et plus vite, de relier Paris à Marseille en 30 min, de vivre dans un monde sans contrainte ni pénurie. La promesse techno-esclavagiste introduirait massivement les robots dans notre monde pour qu'ils travaillent à notre place comme pourraient le laisser croire les débuts de la voiture autonome ou de l'intelligence artificielle. La promesse de l'augmentation de l'être humain, ou utopie transhumaniste, nous fait croire qu'il sera toujours possible de faire reculer la mort et la déchéance physique grâce aux thérapies géniques, aux technologies augmentées etc.

Toutes ces croyances ne sont pas nouvelles, certaines datent même de l'antiquité. Il faut savoir distinguer les promesses qui resteront utopiques, de celles qui peuvent effectivement être mises en œuvre par le développement



des connaissances. On pourrait encore citer l'utopie réparatrice, où il serait question de nettoyer les océans des plastiques, de ressusciter les mam-mouths, de connecter les arbres pour les protéger des coupes sauvages. La géo-ingénierie, lorsqu'elle veut engager des travaux colossaux, comme un barrage sous-marin pour endiguer la fonte des glaces, est également utopique en raison des difficultés liées à l'échelle gigantesque.

Le recours aux technologies vertes pour traiter la question des SSP est discutable. Il est certain qu'il existe des solutions éprouvées pour dépolluer les sols, mais il convient de rester prudent

vis-à-vis du techno-solutionnisme permanent. En effet, il a toujours des contreparties : effets secondaires des bactéries, consommation de davantage d'énergie et de ressources plus rares, etc. Le concept d'économie circulaire, malgré ses vertus évidentes, montre aussi les limites du recyclage des produits. Plus un produit est complexe, moins il se recycle. Un smartphone contient une quarantaine de métaux différents, dont une bonne partie, dans l'écran, les composants électroniques ou la batterie, ne sont pas recyclés. D'une manière générale, la récupération de matière n'est jamais totale. Une autre limite concerne les effets déportés : réduire un impact peut amener à

en créer d'autres ailleurs. Le cas de la voiture électrique est intéressant car son bilan environnemental n'est positif que sous certaines conditions : poids du véhicule, type et poids de la batterie, sa provenance, mix énergétique de l'électricité etc. S'agissant des voitures autonomes, s'il fallait transmettre et conserver toutes leurs données en permanence, la consommation numérique d'un million de véhicules équivaldrait à la consommation numérique mondiale actuelle. Idem pour la smart city.

L'effet rebond constitue la dernière limite aux solutions technologiques. L'efficacité technique, en permettant de consommer moins de matière et d'énergie, produit aussi de l'efficacité économique, ce qui entraîne à son tour une augmentation de l'usage et de ses impacts. Les gains d'efficacité sur le kérosène illustrent bien le phénomène, puisqu'ils ont permis l'émergence des compagnies aériennes low cost. De la même façon, le faible coût du covoiturage incite à plus de mobilité. Dans le secteur numérique, l'effet rebond est particulièrement élevé : le power usage effectiveness (PUE), c'est-à-dire l'efficacité énergétique du numérique, s'avère très performant mais il est rattrapé par l'explosion de la consommation

numérique mondiale. Contrairement aux idées reçues, c'est bien l'offre qui crée la demande, oriente la consommation, et non l'inverse. Concernant les sols, il faudra être vigilant sur l'effet rebond car il pourrait inciter à polluer davantage du fait qu'il existe des techniques de dépollution des sols.

Le progrès fulgurant de la connaissance s'accompagne d'une avancée tout aussi importante vers la complexité, engendrant la difficulté de cerner les solutions qu'il faudrait développer. Or, face à cet appétit des ressources intrinsèque à la nature humaine, il faut savoir faire preuve de techno-discernement pour orienter le génie humain sur les bons sujets. Le big data pourrait ainsi être utilisé pour la dépollution des sols, au lieu d'alimenter des comportements de consommation de masse. La sobriété devra aussi être de mise. Économiser à la source reste la solution la plus efficace. Qu'il s'agisse des sols, des océans, ou autres, il est toujours plus facile de préserver que de réparer. Sur la question du bâtiment, il convient de

se demander s'il est encore pertinent d'édifier du neuf alors que les mètres carrés déjà construits sont actuellement mal utilisés. La priorité serait d'intensifier les usages des bâtiments anciens, de privilégier leur restauration avant d'en construire d'autres. Pour limiter l'impact du transport, il suffirait de réduire significativement le poids des voitures, mais cela va à l'encontre de la tendance actuelle. Le succès des ventes des sportive utility vehicles (SUV) est tel que le niveau moyen d'émission des véhicules a augmenté. Il apparaît clairement que les solutions ne sont ni techniques ni technologiques, mais sociotechniques. Les innovations doivent être accompagnées d'un meilleur usage de celles-ci.

Nous avons besoin d'un changement de paradigme où nos innovations seront plus sociales, plus sociétales, plus culturelles, plus organisationnelles. Elles devront aussi être courageuses (réglementaires, liberticides...), car l'humain étant plus un imitateur qu'un innovateur, il lui est toujours plus difficile d'agir différemment.

“Nous avons besoin d'un changement de paradigme où nos innovations seront plus sociales, plus sociétales, plus culturelles, plus organisationnelles”



Revoir l'intégralité de l'intervention de Philippe BIHOUX

Impacts sanitaires et sociaux des sites contaminés



 **Morceaux choisis**

Philippe HUBERT
Directeur des risques chroniques, INERIS



Marco MARTUZZI
Programme Manager, Environment and Health Impact Assessment, Organisation mondiale de la santé (OMS)

Philippe HUBERT : Les nombreux recensements des sites contaminés donnent une connaissance précise de leurs nombres, de leurs surfaces, mais le nombre de personnes impactées sur les plans sanitaires et sociétaux reste pour une large part méconnu. Quelques estimations existent pour les grands sites. La zone du site atelier autour de Metaleurop toucherait 55 000 personnes, ce qui est un record.

Marco MARTUZZI : À l'échelle européenne, il existe des centaines de milliers de sites contaminés, plus ou moins grands et pollués, mais nous ignorons encore à quel point ils affectent la santé des populations. Mieux évaluer ces impacts est une priorité et dans cette perspective, plusieurs études épidémiologiques spécialisées ont commencé à donner un éclairage intéressant. Pour autant, aucune de ces études n'est incon-

épidémiologiques, mais celles-ci ne servent qu'à la surveillance. Déterminer si un site peut avoir une incidence sur les occurrences de cancer exige des études sur de très longues périodes. Les impacts sociétaux sont plus évidents puisqu'ils font déplacer des écoles, des familles, des groupes d'habitation ou empêchent les personnes d'utiliser leurs terrains pour cultiver. Pour les sites les plus importants, il est question de territoires contaminés, avec des répercussions sur l'économie et des perturbations sociétales possibles. C'est le cas des Antilles particulièrement touchés par la pollution au chlordécone.

MM : Pour mesurer le risque inhérent aux sites contaminés, des études peuvent être faites sur la mortalité, sur les fréquences de cancer. D'autres indicateurs de signaux plus faibles peuvent servir comme les nuisances liées aux bruits ou

“L'incertitude est intimement liée à la décision à prendre”

turnable. Le choix de l'étude dépendra des circonstances, des informations disponibles, de l'accès aux bases de données, etc. Pour bâtir une vision globale de la situation sanitaire, il faudrait utiliser plusieurs études complémentaires. PH : Les impacts sur la santé peuvent être observés à partir d'études

aux odeurs. L'éventail des méthodologies est large et celles-ci sont aujourd'hui bien établies et standardisées.

Il n'existe pas de risque acceptable dès lors que l'impact sur la santé des personnes n'est pas nul. Les niveaux très faibles d'exposition sont évidemment

tolérés. Le plus souvent, la documentation sur les risques encourus est inégale et pour les personnes vulnérables exposées à ces risques, cela n'est pas acceptable. En matière d'évaluation des risques, le taux acceptable doit rester inférieur à un cas sur cent mille. Le niveau du risque acceptable est aussi une notion relative, qui peut varier suivant les métiers considérés, qui peut dépendre de certains standards.

“En matière de gestion des sites pollués, réduire tout à la santé conduit à passer à côté d'une partie des enjeux, il faut aussi intégrer les enjeux sociétaux qui sont primordiaux”

PH : De nombreuses méthodes existent pour évaluer les risques liés aux sites contaminés. Le calcul du quotient de danger est un ratio entre la quantité d'un contaminant à laquelle est exposée un individu et le niveau maximal préconisé pour cet individu à cette substance. Une autre technique consiste à mesurer le nombre de décès en excès : s'il dépasse 1×10^{-5} , le risque est avéré. L'OMS utilise le « disability adjusted life years » (DALY) qui calcule les années de vie

perdues par les maladies et les morts prématurées pour comparer la santé environnementale dans le monde. Le panel de types de mesures de risque est en réalité largement supérieur à ce qui est généralement pratiqué. Il serait intéressant d'appliquer ces outils d'évaluation de la santé publique à la question des sols pollués.

Une autre approche est celle des inégalités environnementales. En intégrant les

sites pollués dans des cartes d'inégalité environnementale, il devient aisé de comparer l'exposition aux matériaux de ces sites à d'autres sources d'exposition naturelle. L'inégalité environnementale s'exprime également lorsqu'au sein d'un même territoire, une population, parce qu'elle est plus vulnérable que d'autres, s'avère davantage exposée aux contaminants.

MM : Les incertitudes sont substantiellement liées aux évaluations des sites contaminés tant le caractère multifactoriel de ces études les rendent complexes. Il est essentiel que la restauration des sites, qui est également un exercice difficile et coûteux, prenne la mesure de la dimension sanitaire du projet. Cela peut en effet influencer sur les techniques de réhabilitation ainsi que sur les usages possibles du site une fois réhabilité.

PH : Prendre en compte l'incertitude nécessite d'employer des outils suffisamment souples pour faire des simulations, à partir desquelles

construire cette incertitude. Celle-ci est intimement liée à la décision à prendre. Elle ne sera pas traitée pareil si l'objectif se limite à satisfaire une obligation sanitaire réglementaire, par exemple respecter un seuil avec un degré de confiance suffisant, ou si le projet est de rechercher la solution optimale pour la qualité de vie des personnes vivant près du site contaminé. Auquel cas, il faut travailler non seulement avec les experts de la réhabilitation, mais aussi avec les parties prenantes du site contaminé.

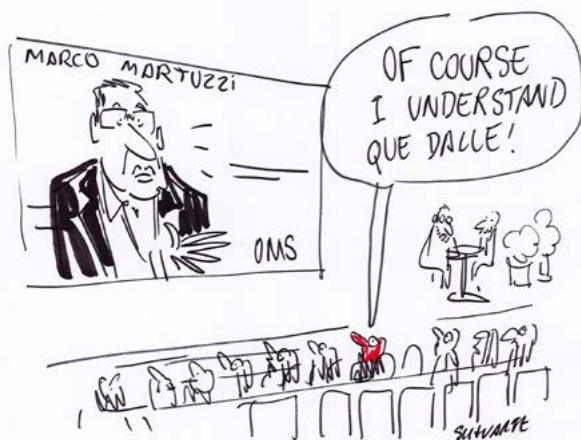
Il serait intéressant que la réhabilitation des SSP soit effectuée sous l'angle de la santé publique pour pleinement intégrer la dimension sanitaire de cette mission. Pour autant, il ne faut pas oublier que le sujet répond aussi à des enjeux sociétaux qu'il faudra savoir intégrer.

Pour en savoir plus :

[Inégalités en matière d'environnement et de santé en Europe. 2nd rapport d'évaluation \(2019\), OMS :](#)

[Synthèse](#)

[Rapport complet \(en anglais uniquement\)](#)



Revoir l'intégralité de l'intervention de Philippe HUBERT et Marco MARTUZZI

Prise en compte des incertitudes dans la gestion des sites et sols pollués



Dominique GUYONNET
Directeur de programme scientifique, BRGM

“En matière d’évaluation des incertitudes, la méthodologie doit être choisie en fonction des informations disponibles”

Le BRGM, l’ADEME et d’autres partenaires ont réalisé une synthèse sur le traitement des incertitudes sur tout le cycle de la donnée dans un contexte de gestion de SSP dont voici les principaux enseignements.

Entre l’étude documentaire sur les origines de la pollution jusqu’aux travaux de réhabilitation et la surveillance du site, la gestion d’un SSP nécessite plus d’une quinzaine d’étapes, où chacune produit de l’incertitude ou en est affectée. Pour traiter au mieux ces incertitudes, il convient d’appliquer des méthodologies en cohérence avec la nature des informations disponibles. Dans la gestion d’un SSP, certains paramètres présentent des valeurs variables. Lorsque la valeur maximale de cette variable reste inférieure au seuil recherché, ou lorsque la valeur minimale est supérieure au seuil, les deux marches à suivre sont évidentes. En l’absence d’évidence dans cette borne de l’intervalle, d’autres procédés sont nécessaires. Dans l’approche probabiliste classique, la manœuvre consiste à répéter une opération de manière à mesurer la variabilité d’une population, pour différencier les erreurs systématiques des erreurs aléatoires. L’incertitude est ensuite représentée dans une courbe de distribution gaussienne classique autour de la moyenne. Pour identifier les méthodologies adéquates, il faut s’intéresser à la nature des phénomènes variables (variabilité spatiale, temporelle, ou variabilité liée à la diversité des types d’informations...)

mais aussi au niveau d’informations disponibles.

Dans le cas d’une série d’informations complète et précise, il sera possible de construire un diagramme des fréquences qui servira à évaluer l’incertitude et à la propager dans un modèle, si besoin après l’avoir couplée à une loi de probabilité. Dans le cas d’une série d’informations peu précises, équivalentes par exemple à des dires d’experts, il faudra établir un intervalle nuancé pour obtenir *in fine* une famille de probabilités. Une autre possibilité serait de considérer la distribution des données selon une loi normale dont la moyenne et l’écart-type seraient inconnus pour obtenir une famille paramétrique de distribution de probabilités.

Restituer l’information sur le manque de connaissances offre davantage de cohérence par rapport à l’information disponible et peut inciter à collecter d’autres données pour réduire l’incertitude. Néanmoins, cela exige des efforts calculatoires supplémentaires et davantage d’explications.

Par ailleurs, il convient de s’interroger sur la pertinence de comparer des données reposant sur de nombreuses incertitudes avec un seuil précis. Des seuils flous existent, ils se situent dans une zone de transition entre d’une part des valeurs parfaitement acceptables et d’autre part des valeurs parfaitement inacceptables.

Pour comparer des valeurs imprécises à des valeurs seuil, il serait intéressant de s’inspirer de l’indice de confiance produit par les météorologues, pour

avoir des indicateurs uniques de l'acceptabilité de dépasser ou non un seuil. En dehors des approches calculatoires existent des approches plus sociétales, destinées à une compréhension partagée. Celles-ci sont requises lorsque par souci de transparence, il est souhaité de restituer aux parties prenantes du projet les connaissances issues de l'expertise, avec les incertitudes associées.

Question de la salle

Quantifier toutes les incertitudes à chaque étape du cycle de la donnée est-il pertinent ?

Il serait illusoire et contre-productif de le faire à toutes les étapes du cycle. En revanche, traiter les incertitudes sur des points particuliers, lorsque cela peut influencer par exemple sur le dépassement ou non d'un seuil, l'arrêt ou la poursuite des actions des dépollutions s'avère essentiel pour des raisons de responsabilité.

Dans quelle mesure la prise en compte des incertitudes peut-elle être prise en compte dans la décision publique et la communication qui l'accompagne ?

La pédagogie est la clé d'une communication réussie : une information juste est

celle que l'interlocuteur est à même de comprendre. L'indice de confiance pour les prévisions météorologiques à 2 ou 3 jours est un bon exemple de communication adaptée à l'interlocuteur.

Dans le cadre des évaluations des risques pour les écosystèmes, il est nécessaire de prendre en compte les incertitudes, mais aussi de les réunir pour au final obtenir une information agrégée appelée « weight of evidence ». Cela aide à prendre une décision et à communiquer autour des incertitudes.

Cela rejoint l'idée de la bancarisation de l'information, qui met à disposition toutes les données susceptibles d'être utilisées par l'expérimentateur afin que ce dernier donne son jugement d'expert.

comportement du polluant. Or, il n'est pas possible de quantifier l'incertitude d'une information si cette dernière est trop parcellaire.

Jean-Marie CÔME, Directeur R&D Ginger-Burgeap et membre de l'UPDS : Le fait de débattre aujourd'hui de cette question, d'y travailler collectivement est le signe d'une certaine maturité de la communauté des acteurs des SSP. Il est intéressant d'aborder le sujet sous l'angle du cycle de la donnée environnementale car cela permet de compartimenter les problématiques et de se concentrer sur les maillons essentiels à développer. En premier lieu, il faut réussir à limiter les incertitudes liées aux protocoles d'échantillonnage.

Dans un site à forte variabilité spatiale, deux échantillons séparés de quelques dizaines de centimètres peuvent présenter des incertitudes supérieures à un facteur deux. C'est pourquoi il est crucial d'avoir une bonne connaissance du comportement du polluant pour réaliser un échantillonnage pertinent, cohérent avec le polluant à traiter. Un autre axe de progrès concerne la traçabilité de l'analyse, depuis l'échantillon jusqu'à la restitution d'un plan de gestion. Enfin, il serait profitable que l'analyse coûts-bénéfices, réalisée en fonction d'un objectif, accompagnée de l'argumentaire du prestataire fasse également l'objet de recherches plus approfondies.



Les perspectives de recherche :

- identifier des méthodes pour réduire les incertitudes,
- améliorer les échantillonnages des différents milieux,
- avoir des analyses plus fiables,
- disposer de méthodes indirectes pour mieux cibler l'analyse précise,
- améliorer les méthodes géostatistiques,
- alimenter les fonds pédogéochimiques, gérer mieux les informations actuellement très clusterisées, dont la disponibilité s'avère inégale,
- chercher des alternatives aux seuils coupe-rets,
- développer des outils de communication pour un meilleur partage des enjeux autour des SSP, en incluant les incertitudes,
- travailler la représentation des incertitudes dans les bases de données,
- mieux représenter l'imprécision

Pour en savoir plus:

[GUYONNET D, DUBOIS D, DE FOUQUET C, GHESTEM JP, LEPROND H, ATTEIA O, COME J-M. 2019. État de l'art sur la prise en compte des notions d'incertitude dans la gestion des sites et sols pollués.](#)

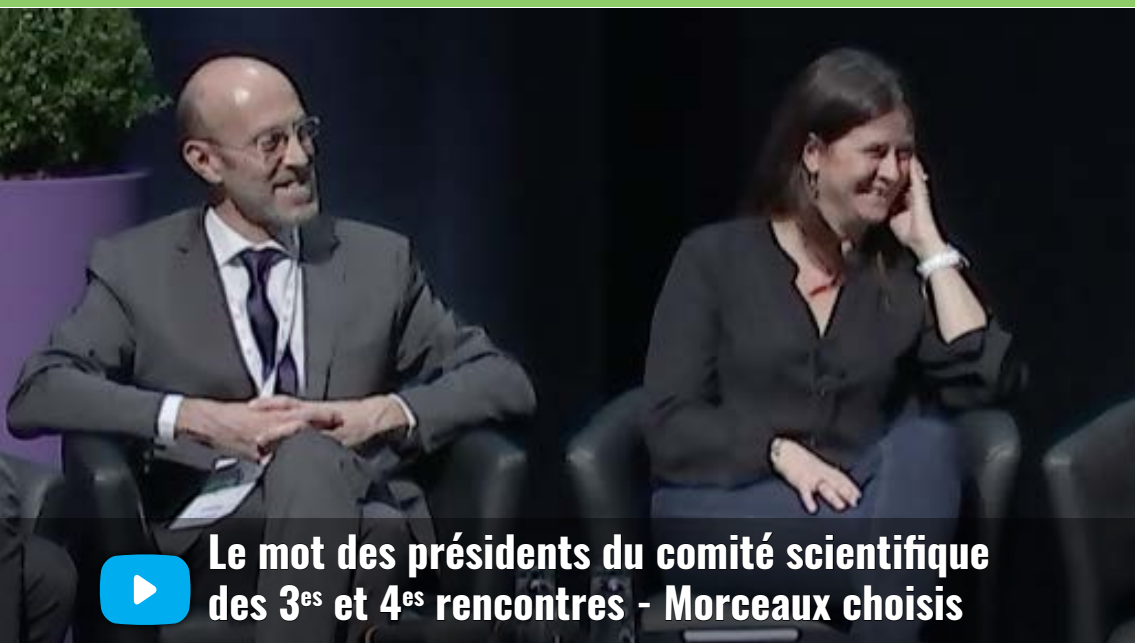
Comrisk.fr

Commentaires de la table ronde

Nathalie GUISEIX, Présidente d'Innovasol et référente sites et sols pollués Renault : L'un de nos sites était pollué aux hydrocarbures. Après un traitement de cinq années et des contrôles réguliers, les concentrations de polluants n'ont pas diminué. Cela pose la question de la fiabilité du diagnostic initial et des incertitudes associées.

Dominique GUYONNET, Directeur de programme scientifique, BRGM : Cela renvoie à la question de l'incertitude liée au modèle conceptuel. Si les données historiques et documentaires sont insuffisantes, cela peut induire une mauvaise compréhension du site et du

La recherche et l'innovation sur les sites et sols pollués



 **Le mot des présidents du comité scientifique des 3^{es} et 4^{es} rencontres - Morceaux choisis**

“L’objectif est d’amener la recherche sur les SSP vers de la recherche appliquée, en interface avec les partenaires et acteurs du sujet”



Frédérique CADIÈRE
Correspondante recherche, ADEME

À l’issue de la 3^{ème} édition des rencontres, l’ADEME a dressé un bilan des actions de recherche en SSP en cohérence avec sa stratégie recherche en cours de révision. Sur les 181 opérations financées, une centaine a été terminée, ce qui a permis de dégager des acquis et de travailler sur des perspectives de recherches qui alimenteront la prochaine programmation. Il s’agissait aussi d’identifier les connaissances qui étaient assez matures pour les partager avec les partenaires du réseau ESSORT afin qu’ils les intègrent dans les pratiques de gestion des sites pollués.

La réalisation du bilan 2010 – 2016 s’est appuyée sur les services friches urbaines et sites pollués et animation recherche de l’ADEME ainsi que sur l’aide des partenaires, notamment les coordinateurs des projets qui ont répondu à un questionnaire sur les actions de valorisation engagées. Il est ainsi apparu que 110 publications scientifiques ont découlé de ces projets, ainsi que des outils méthodologiques et des formations.

Trois modalités de soutien ont été développées :

- la production de nouvelles connaissances, (soutien financier à 146 projets, études et thèses) depuis la caractérisation des milieux jusqu’à la requalification des friches,
- les actions de transfert, en vue d’assurer l’utilisation des innovations pour la gestion des SSP,
- l’animation de réseaux et les actions pour l’orientation de la RDI, pour une recherche à l’écoute des besoins opérationnels des acteurs.

Les projets sont sélectionnés par appels à projets de recherche (APR), notamment GESIPOL (5 éditions depuis 2013) ou via d’autres APR transversaux comme CORTEA sur la qualité de l’air intérieur qui intègre les questions sur les remontées de vapeur depuis les sols. L’objectif est d’avoir des résultats opérationnels qui seront traduits dans des guides méthodologiques, dans des bases de données, des outils d’aide à la décision, des normes, etc.



L'ADEME ayant la mission de gestion des sites à responsabilité défaillante, elle est aussi l'une des premières utilisatrices des innovations (ex : phyto screening, les bio-indicateurs). Cette position lui permet également d'identifier des questions à intégrer dans sa programmation, de proposer que certaines de ces innovations soient intégrées dans le cadre méthodologique national (ex bio-indicateurs, outils de géophysique, outils de biologie moléculaire - intégrés

dans la mise à jour de 2017).

L'ADEME participe également à un autre projet en cours et piloté par le BRGM qui consiste à rédiger des fiches innovation pour développer l'utilisation des technologies innovantes de caractérisation. Il est essentiel de sortir des labos et de diffuser au-delà des publications scientifiques pour aller vers les pratiques professionnelles.



Chiffres-clés sur la période 2010 -2016 :

25,5 millions d'EUR consacrés à la RDI

235 acteurs différents (établissements publics, praticiens, des entreprises, gestionnaires de sites pollués, associations)

2,8 partenaires par projet



Jean-Marie CÔME
Directeur R&D Ginger-Burgeap,
membre de l'UPDS et président des
3^{es} Rencontres de la recherche sur
les SSP

La répartition des communications des 3^{es} rencontres de la recherche en SSP illustre d'une certaine façon le positionnement de la communauté scientifique en 2014. 60% des contributions portaient sur les progrès concernant les méthodes et les outils de diagnostic. 30% concernaient l'amélioration des techniques de dépollution, comme le traitement des zones sources ou le rôle des phytotechnologies pour l'épuration et la remise en fonction des systèmes dégradés. Des avancées avaient aussi été enregistrées sur les liens entre qualité de l'air intérieur et SSP, avec des passages importants du pilote jusqu'au stade du terrain. Seulement 10% des communications relevaient des questions économiques, juridiques et sociales, ce qui témoignait des difficultés à mobiliser les chercheurs de ces disciplines sur ces enjeux.

Ces 3^{es} rencontres avaient renforcé le dialogue entre les parties prenantes, qui avaient exprimé le souhait de disposer de lieux d'échanges qui s'inscrivent dans la durée pour dépasser

la méconnaissance qu'ils avaient les uns des autres et être plus attentifs aux besoins des professionnels. Des verrous techniques et scientifiques avaient été identifiés sur la gestion des incertitudes, la quantification des masses de polluants, les performances des traitements. Souvent les innovations peinaient à pénétrer le marché à cause de la faible adhésion de l'administration ou des maîtres d'ouvrage pour ces solutions nouvelles. Ainsi, il pouvait y avoir un décalage entre la production de la recherche académique et les besoins réels des professionnels. Par exemple, 25% des recherches concernaient les phytotechnologies alors que leur utilisation par les professionnels reste marginale.

Pour faire progresser la recherche, il est essentiel de partager les retours d'expérience, les réussites comme les échecs. La communauté avait également exprimé le besoin de disposer de sites ateliers de démonstration permettant de mutualiser l'instrumentation des sites, notamment pour le suivi de



longue durée. Les observatoires mis en place par le GISFI, sur des sites de cokeries ou des techno-sols construits étaient à ce titre remarquables.

Les entreprises actives sur les SSP sont des petites structures évoluant dans un marché modeste et leurs moyens budgétaires limités ne pouvaient suffire à financer la recherche. En parallèle, les programmes de l'ANR (PRECODD et ECOTECH) et du Gessol prenaient fin. Le programme GESIPOL de l'ADEME était le dernier en cours.

À l'issue de ces rencontres, le conseil scientifique avait dressé un bilan duquel est ressorti un fort besoin d'approfondir les recherches sur les incertitudes, les transferts et les transports de polluants, la prise en compte de la non-accessibilité, les réactifs novateurs et les nouveaux capteurs et les polluants émergents.

Une centaine de propositions d'actions concrètes avait émergé et visait entre autre :

- une acquisition des connaissances opérationnelles (durée de vie des zones sources, solutions de traitement), des travaux de recherche amont,
- des développements d'outils comme la méthode Barge simplifiée (test simplifié basé sur l'extraction à l'acide chlorhydrique),
- des opérations de démonstration (travaux sur la base de données « Bruits de fonds »),
- la valorisation des connaissances,

notamment sur les outils géostatistiques et sur la qualité de l'air intérieur (lien entre un site pollué et le milieu du bâtiment dans le cadre d'un aménagement urbain),

- des actions transversales comme la création du réseau ESSORT en 2016, né d'une volonté forte des acteurs et des importants échanges entre l'UPDS, Innovasol et l'ADEME.

Les projets de recherche se sont dès lors structurés autour de grandes thématiques, à savoir les techniques de dépollution, la géostatistique et la prise en compte des besoins des professionnels. Les trois éditions des APR GESIPOL ont largement contribué à impulser ce mouvement, mais il convient de mentionner également le rôle d'autres APR dont le champ recouvrait en partie celui des SSP : CORTEA, GRAINE, ANR, DPIA, DPSPC ainsi que la recherche européenne. À cela s'ajoutent des appels à projet innovation qui pouvaient aboutir à des résultats similaires à de la R&D très finalisée.

Entre les 3^{es} et ces 4^{es} rencontres, certains faits marquants ont pesé sur la trajectoire de recherche, comme la mise à jour de la méthodologie SSP de 2019, la mise en exergue de plusieurs outils innovants (la dendrochimie, la biodisponibilité, les bio-indicateurs et la géostatistique). D'autres événements moins en lien direct avec la thématique des SSP ont aussi influé : les Accords de Paris et l'initiative française du 4 pour 1000, la loi TECV et son volet sur

l'économie circulaire, le rapport du GIEC de 2018 sur l'impact d'un réchauffement à 1,5C°, l'objectif neutralité du carbone, le rapport IPBES sur la biodiversité qui rappelait l'importance de limiter l'artificialisation des sols, la transition numérique, l'essor du BIM dans le bâtiment et l'émergence de l'intelligence artificielle. Dans ce cadre, les réflexions de Philippe BIHOUIX sur le techno-discernement sont à prendre en considération dans le choix des technologies qui seront à développer.



Nathalie GUISERIX

Présidente d'Innovasol et référente sites et sols pollués Renault et présidente des 4^{es} Rencontres de la recherche sur les SSP

Cette année, les communications ont été organisées autour de cinq thématiques. La caractérisation et l'interprétation des résultats, la compréhension des mécanismes et transferts de polluants, les techniques de dépollution et les modalités de gestion ont reçu l'essentiel des contributions. L'exposition et les impacts vers le vivant est un thème prometteur, mais qui a reçu relativement peu de contributions. A contrario, celui sur les villes et territoires durables a bien émergé par rapport à la précédente édition.

Il est intéressant par ailleurs de noter que l'essentiel des contributions est porté par des acteurs de la recherche et dans une moindre mesure par des entreprises du métier et des organismes d'État ou assimilé. Seulement 5% des présentations sont données par des donneurs d'ordre. À titre comparatif, pour la grande conférence internationale Battelle 2018 qui affichait 495 présentations, seulement 17% des contributeurs étaient des chercheurs, la majorité des communications provenant d'entreprises du métier.

Étonnamment, le fort intérêt pour les polluants émergents en 2014 ne s'est pas confirmé pour cette édition alors qu'à l'étranger, le thème fait l'actualité (plainte récente contre le gouvernement australien pour pollution des eaux souterraines). Un nombre conséquent de communications aborderont le thème des mousses, qui semble être une spécificité française, ainsi que sur le traitement thermique. Un focus portera sur le rôle des champignons, bien que la technique soit encore en développement au laboratoire.

Même si ces journées ne sont pas strictement comparables, le programme de Battelle 2018 a fait la part belle aux retours d'expérience et a mis à l'honneur la question des contaminants émergents sur toute la chaîne des SSP, du diagnostic à la dépollution. Les thèmes des zones fracturées, des incertitudes liées à la caractérisation, de la communication avec les parties intéressées y ont été largement approfondies. Le format mini-formation dans des ateliers « learning lab » est proposé et intéressant car il permet aux BE et aux

industriels d'être confrontés à un nouvel outil et d'échanger entre eux et avec leurs concepteurs sur les applications possibles de l'outil. Cet exemple a été une source d'inspiration pour le comité scientifique.

L'objectif de ces 4^{es} rencontres est bien de dynamiser les échanges et de favoriser les retours d'expérience. C'est dans cette perspective que les intéressés travailleront dans le « forum ouvert » sur les incertitudes, car il y a beaucoup d'attentes sur ce sujet : quelles perspectives de recherches, quelle prise en compte au quotidien, quelle communication avec l'administration et avec les parties intéressées ? Dans le même esprit, la session posters est accompagnée d'une démonstration d'outils.

Tout au long de ces rencontres, une attention particulière sera portée sur les progrès concernant la compréhension du transfert et du transport des polluants, sur la valorisation des connaissances permettant au maître d'ouvrage d'appliquer sur le terrain les solutions innovantes. Par ailleurs, il sera très intéressant d'approfondir les thématiques de la planification urbaine qui consiste à redonner aux anciennes friches un autre usage non industriel. Enfin, il faudra trouver comment mieux intégrer les projets SSP dans des projets plus vastes pour les associer aux sciences économiques et sociales.



Synthèses des principales pistes de recherche mises en évidence au cours des 4^{es} Rencontres nationales de la recherche sur les sites et sols pollués

15 Axe 1 : Caractérisation

16 Axe 2 : Compréhension des mécanismes & transferts de polluants

17 Axe 3 : Exposition et impacts vers le vivant

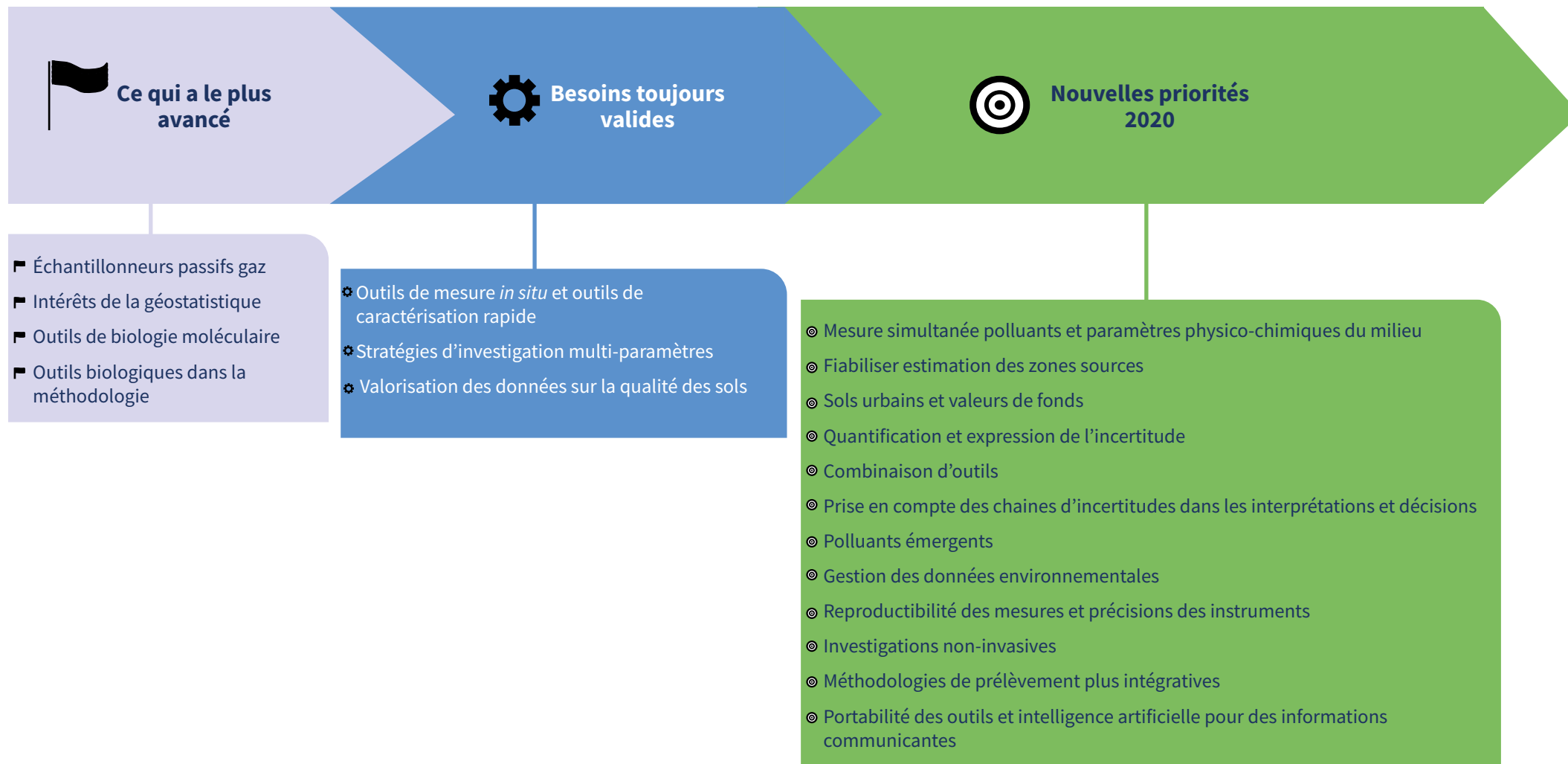
18 Axe 4 : Techniques de dépollution, modalités de gestion et travaux

19 Axe 5 : Villes et territoires durables

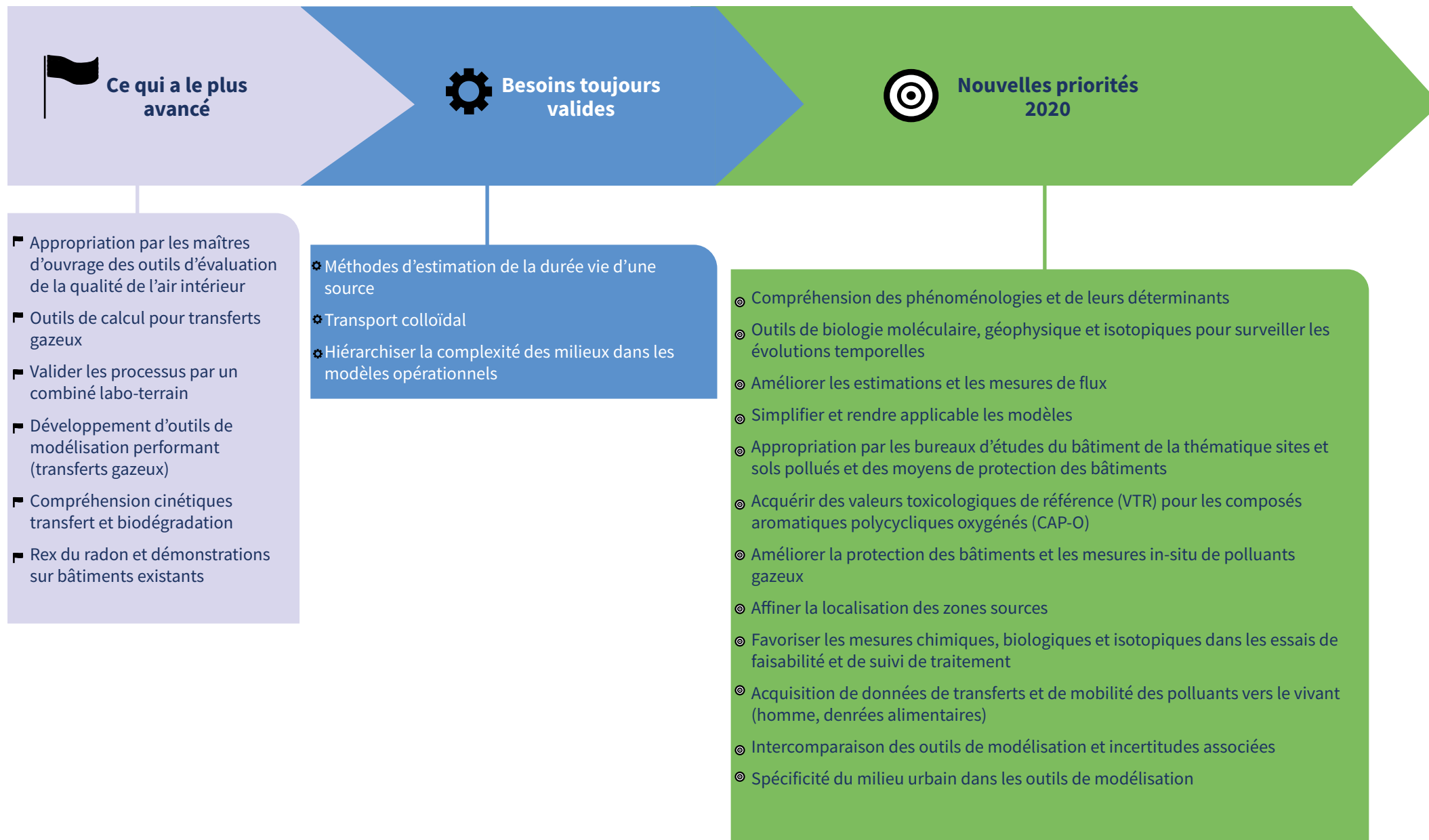


**La recherche et l'innovation sur les sites et
sols pollués - Version intégrale**

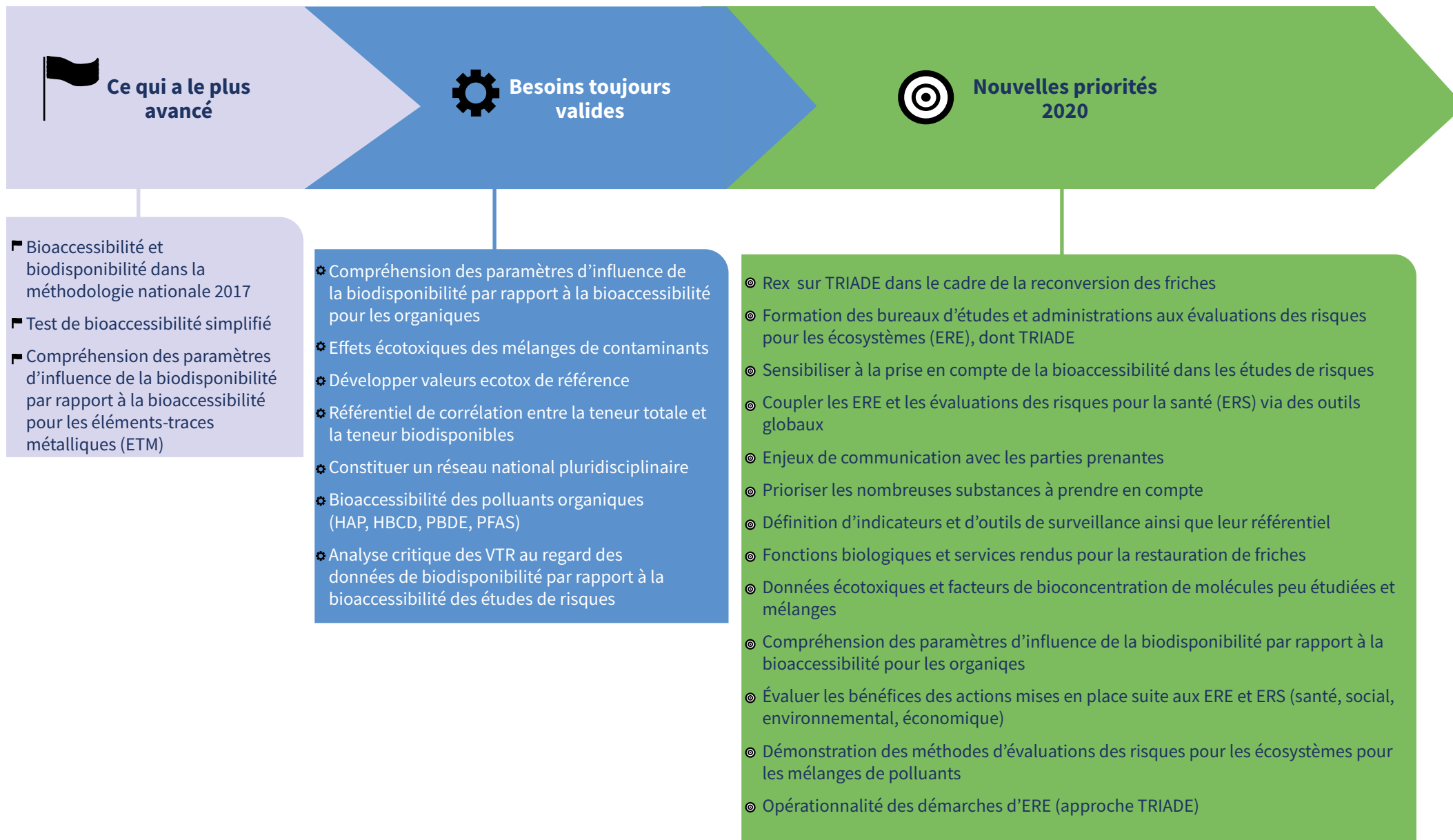
Axe 1 : Caractérisation



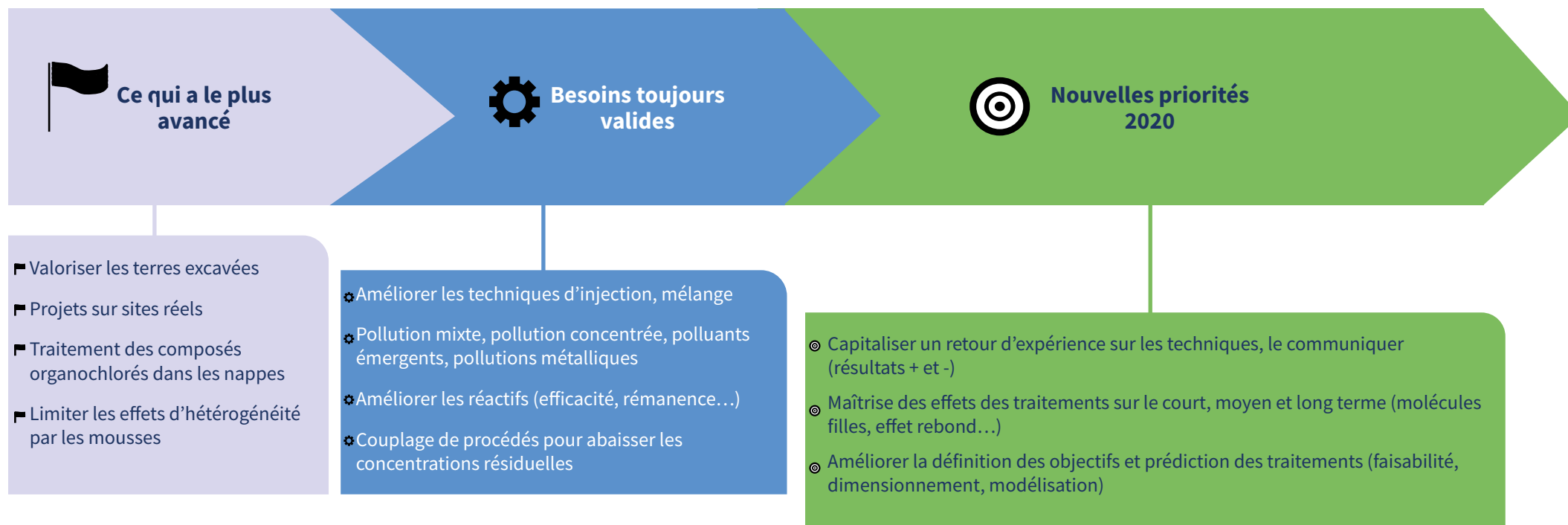
AXE 2 : COMPRÉHENSION DES MÉCANISMES & TRANSFERTS DE POLLUANTS



AXE 3 : EXPOSITION ET IMPACTS VERS LE VIVANT



AXE 4 : TECHNIQUES DE DÉPOLLUTION, MODALITÉS DE GESTION ET TRAVAUX



AXE 5 : VILLES ET TERRITOIRES DURABLES



LES ATELIERS THÉMATIQUES

- 21 **Interprétation des résultats, bases de données, valeurs de fonds**
- 23 **Impacts environnementaux et sanitaires I & II**
- 26 **Requalification écologique et économique des sols dégradés**
- 29 **Utilisation des mousses pour le traitement**
- 31 **Place des sols dans la ville durable**
- 33 **Transferts dans les milieux I & II**
- 36 **Outils de caractérisation**
- 38 **Traitements biologiques et phytomanagement**
- 41 **Traitement des pollutions concentrées**
- 43 **Prise en compte des incertitudes - *Forum ouvert* -**

Atelier interprétation des résultats, bases de données, valeurs de fonds



Philippe MONIER
Retia

Sylvaine MAURAU
EDF

Le constat

Cet atelier s'articulait autour des données attachées à la connaissance des sols en France depuis la définition de fonds pédo-géochimiques jusqu'à la mise en évidence de pollutions et des risques associés. Comment acquérir et partager les données ? Comment en maîtriser les incertitudes ? Quels sont les outils pour valoriser ces données dans les différentes étapes de gestion des sites et sols pollués ?

Grâce notamment aux travaux du GIS Sol qui se déploient depuis 20 ans, la

communauté des SSP accède à présent de façon coordonnée à différentes bases de données (BDAT, BDETM, IGCS, RMQS) avec la mise en ligne d'informations sur les types de sol en France et la répartition des concentrations en différents constituants. La collecte d'échantillons de sol, leur analyse et l'interprétation des résultats, ainsi que le partage d'informations acquises dans différents contextes de surveillance des sols, génèrent un nombre considérable de données qui sont ainsi capitalisées. Cette capitalisation est accompagnée d'une réflexion sur

les formats de mise à disposition qui sont multiples et les outils de requête qui accompagnent leurs utilisations. Toutes ces données sont ainsi harmonisées dans un système d'informations centralisées afin de faciliter leur exploitation et leur diffusion, pour produire des références, des cartes ou calculer des indicateurs synthétiques.

L'identification, à défaut de la maîtrise, de l'incertitude qui environne toutes ces données reste un sujet fondamental qui accompagne à présent assez naturellement l'édition des données ou des résultats qui valorisent ces données. À ce titre, l'apport d'une pratique désormais plus opérationnelle des géostatistiques est prometteur pour avoir une meilleure prise en compte des incertitudes, mais également des hétérogénéités dans la répartition des données et de leur signification. Des approches géostatistiques peuvent ainsi être mises en œuvre pour traiter les informations et distinguer les hétérogénéités liées au fond géochimique et les anomalies liées à des pollutions. Une telle approche permet alors de maîtriser la valorisation des terres excavées en précisant les fonds géochimiques locaux lorsque ceux-ci dépassent les valeurs seuils du guide de valorisation des terres excavées.

Au-delà de leur capitalisation, l'atelier a permis également d'éclairer des voies d'utilisation des données de sols :

- dans le cadre de la définition des valeurs de fonds géochimiques locaux ;
- dans la définition de signatures qui aident à l'interprétation d'observations en milieu industriel ou urbain avec des historiques souvent difficiles à appréhender ce qui entrave la bonne définition des campagnes de caractérisation voire des modes de gestions envisageables ;
- dans la maîtrise des pratiques d'écriture des données dans les situations où l'on observe des contrastes de teneurs importants, afin de gérer objectivement la perte d'information sans perdre pour autant le sens du résultat final ;
- dans le développement du couplage entre la modélisation géostatistique de la pollution des sols et la modélisation des risques sanitaires potentiels pour les usages futurs.

Les lacunes

L'effort d'acquisition des données fête

ses 20 ans, mais la vie des bases de données qui permettent leur partage et leur valorisation est beaucoup plus récente. Le défi pour la communauté des SSP est double : faire vivre un jeune adulte en poursuivant l'acquisition des données, notamment à différentes échelles géographiques, et un jeune enfant que sont ces nouveaux supports d'informations partagées.

La prise en compte des incertitudes est réalisée au niveau des techniques utilisées (analyse laboratoire, interprétation géostatistique, cartographie automatique, etc.). Mais nous avons toujours une grande difficulté à quantifier la principale incertitude qui relève du plan d'échantillonnage et du choix de l'échantillon. Cette incertitude, de fait, n'est que rarement évoquée, alors que ses conséquences sur le résultat final sont largement plus importantes que l'incertitude liée à une technique propre.



Dans les efforts pour une maîtrise toujours plus grande de la définition des fonds pédo-géochimiques, le développement de démarches éprouvées et consensuelles pour discriminer les anomalies interprétables en tant que pollutions reste un véritable enjeu tant pour définir les situations nécessitant des mesures de gestion, que pour permettre des mouvements de terres excavées raisonnés à l'échelle du territoire.

Les perspectives

En ce qui concerne les bases de données, au-delà de la poursuite de l'acquisition (y compris en intégrant de nouveaux paramètres et/ou de nouveaux protocoles) et de la capitalisation (traitement et diffusion), il est nécessaire de développer l'interopérabilité des données.

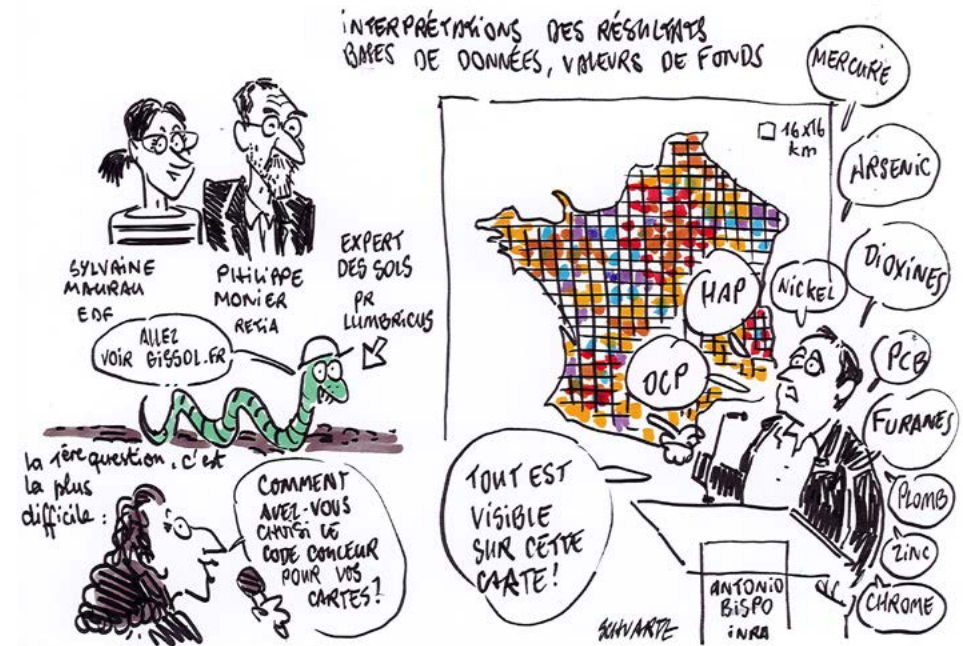
Les approches sont, le plus souvent, mono variables. Les travaux doivent désormais s'appliquer à croiser les données entre elles et avec d'autres

éléments associés afin de contextualiser le plus pertinemment possible les choix de gestion (par exemples la prise en compte : des fonds géologiques, des incertitudes conjointes sur les propriétés du milieu souterrain et sur la pollution, de la propagation des incertitudes sur l'échantillonnage). L'effort à fournir doit s'attacher tout particulièrement aux milieux urbains et à la compréhension des hétérogénéités qui leurs sont associées, afin de permettre d'optimiser la reconquête des milieux urbains dégradés.

La mise en œuvre plus systématique des outils de géostatistiques se traduit bien par l'ouverture sur plus d'étapes de la gestion des SSP, l'application de la géostatistique aux valeurs de risques en est une bonne illustration. La souplesse d'itération entre campagnes de terrain et mise à jour des modèles statistiques doit toujours être consolidée. Enfin, la prise en compte de ces modèles d'interprétation doit désor-

mais être envisagée dans le cadre de modélisation de transferts et pour des médias mobiles (eaux souterraines, gaz du sol, etc.).

L'approche multi-scalaire est aussi à mettre en avant pour préciser le domaine de validité des bases de données et approcher au mieux les anomalies du fond pédo-géochimique. Le niveau de connaissance des fonds pédo-géochimiques doit désormais quitter le domaine national pour descendre au niveau territorial puis local, rejoignant ainsi l'échelle des diagnostics de sites potentiellement pollués. Ceci est un point clé afin d'accompagner l'utilisation opérationnelle des valeurs de fond pédo-géochimique dans le cadre de la réutilisation des terres.



Pour en savoir plus

[Partageons la connaissance des sols](#)

[Base de données sur les sols urbains](#)

[Thèse de Baptiste SAUVAGET](#)

[DoneSol ou comment accéder aux résultats et aux données du GIS Sol en 3 clics !, Christine LEBAS, INRA](#)



Impacts environnementaux et sanitaires 1 & 2



Annette DEVAUFLEURY **Nathalie VELY**
Université de Bourgogne **INERIS**
Franche-Comté

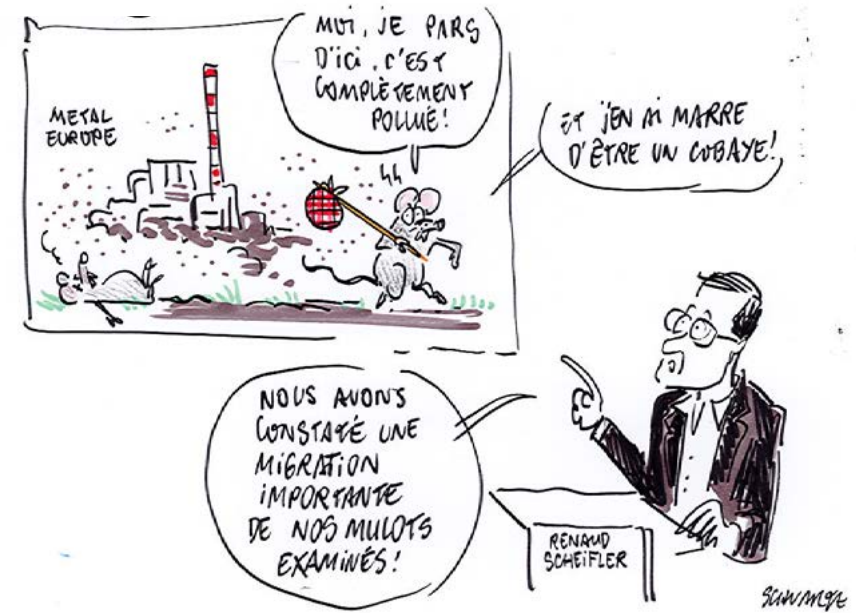
Le constat

Les présentations dans ces deux ateliers ont mis en évidence, notamment pour les évaluations environnementales, des travaux réalisés à différentes échelles (du flacon en laboratoire à l'écosystème) et sur une diversité de contaminants (métalliques et organiques) pouvant affecter les milieux et la santé humaine. Pour les approches environnementales, les travaux présentés montrent que la dimension écologique est désormais prise en compte avec par exemple l'intégration des chaînes trophiques.

L'originalité de l'atelier 2 réside dans la présentation de travaux concernant l'exposition à l'échelle populationnelle à des facteurs de risques environnementaux susceptibles d'avoir un impact sur la santé. Parmi les avancées notables identifiées, on relève les développements pour la collecte et la valorisation des données utilisables tant en ERE (valeurs de référence dans les organismes, facteurs de transferts dans les chaînes trophiques par ex.) qu'en ERS (sélection de variables pertinentes pour caractériser des zones de surexposition des populations par

ex.). À l'occasion des deux ateliers, nous avons aussi pu constater que les méthodes d'investigations des milieux se perfectionnent et tiennent compte des impacts sur le vivant (limitation des prélèvements, des transferts, des destructions). Ces actions et considérations vont dans le sens de limiter les impacts et permettent de dessiner une cohérence avec le principe de préserver les milieux.

Sur la base des études présentées et des discussions, il a été identifié le besoin de rapprocher encore les sujets environnement et santé en traitant de concert les évaluations des risques pour les écosystèmes (ERE) et les évaluations de risques pour la santé humaine (ERS), notamment à travers la modélisation ou la production d'indicateurs pouvant associer les approches chimique, écotoxicologique et écologique. Aujourd'hui, s'il y a bien des tentatives et des approches pour tenter de concilier les deux « mondes »



(ex : à travers les notions de bioaccessibilité), elles restent encore marginales. Le sujet apparaît vaste au regard de la multitude de substances chimiques et de paramètres pouvant influencer sur les

mécanismes de transfert (caractéristiques physico-chimiques des sols et niveaux de pollution, caractéristiques biochimiques et bioaccumulation chez les individus par ex.).

Lors des ateliers sur les impacts environnementaux et sanitaires, la majorité des interventions traitait spécifiquement de l'un ou l'autre des aspects, mais le forum d'idée a permis de souligner que des approches jumelées semblaient possibles et étaient souhaitables. En effet, l'enjeu de l'évaluation des impacts apparaît global pour un site donné ; à la fois pour l'évaluation du potentiel de transfert des contaminants entre les compartiments environnementaux et notamment tout au long de la chaîne alimentaire et pour l'évaluation des risques potentiels pour





Antonio BISPO
INRAE

Arnaud MATHIEU
Santé Publique France

le vivant. Il a également été souligné la nécessité de communiquer dès le début des investigations et régulièrement avec l'ensemble des parties prenantes sur les objectifs et résultats attendus de chacune des approches et l'intérêt d'avoir à les conduire simultanément et de manière intégrée pour éviter d'avoir au final une remise en cause des options choisies.

Les lacunes

Si l'on a pu apprécier les présentations de travaux sur une diversité de contaminants (métalliques et organiques), on peut regretter que la question des cocktails n'ait pas été abordée. Par ailleurs, la diversité dans le choix des contaminants étudiés est très large, ce qui nous conduit à nous interroger sur l'intérêt de prioriser les stratégies de recherche et notamment sur la prise

en compte des effets cocktails.

Par ailleurs, si l'évaluation des impacts environnementaux a bien été considérée jusqu'à l'échelle des communautés, nous aurions également apprécié plus de travaux de démonstration sur l'impact sanitaire au sens impact sur la santé des populations. En effet, il apparaît assez nettement que les approches sanitaires sont moins diversifiées, en termes d'échelles et de contaminants, se limitant souvent à l'évaluation des expositions, sans aller aux impacts sur les populations. Les impacts sur les écosystèmes présentent a contrario des approches beaucoup plus diverses.

Il apparaît un manque de sujets prioritaires qui permettraient de concentrer les recherches en ERE et ERS pour obtenir des résultats concrets et pratiques aux gestionnaires des sols pollués par ex.

La question se pose de l'effet de la réglementation sur les recherches que conduisent les laboratoires. En effet, dans le domaine de la santé, les textes imposent des approches spécifiques pour les évaluations, les laboratoires semblent alors innover à la marge, sur les protocoles (notamment d'exposition), sans réellement tenter/imaginer de nouvelles démarches. La réglementation étant quasi inexistante dans le domaine de l'évaluation environnementale, il semble que les expérimentateurs soient plus libres d'imaginer des recherches beaucoup plus diversifiées, voire originales (ex : impact de la pollution combinée au parasitisme de la faune sauvage).

Des efforts sont conduits en ERE pour mettre en œuvre une méthodologie cohérente avec celle de l'ERS (évaluation de l'exposition à combiner avec celle du danger pour évaluer les risques). Cependant, on manque encore cruellement de données d'écotoxicité pour pouvoir caractériser le danger pour les

organismes (pour les contaminants testés individuellement et encore plus en mélange).

La consultation du public de l'atelier au sujet des pistes de recherche prioritaires a permis de mettre l'accent sur le besoin d'une meilleure intégration de la bioaccessibilité dans les travaux d'évaluation des risques.

Enfin, à travers l'exercice du forum d'idées, les participants à l'atelier ont notamment identifié des enjeux de communication, attendue et souhaitée aux étapes clés des projets avec l'ensemble des parties prenantes et des enjeux d'évaluation des bénéfices des actions mises en place dans les différentes thématiques d'intérêt (santé, social, environnement, économie).

Les perspectives

La mise en perspective de l'exposition aux polluants selon différentes échelles d'un territoire nécessite d'une part le besoin d'harmonisation de méthodes d'évaluation et d'outils permet-

tant de traiter une multitude d'informations collectées sur le terrain telles que la qualité des milieux et aussi de partage des données et des indicateurs pour développer des démarches de diagnostic opérationnelles cohérentes sur l'ensemble du territoire, comme c'est déjà le cas dans le domaine de la surveillance des eaux.

Par ailleurs, comme nombre de polluants sont ubiquitaires, les échanges ont mis en évidence le besoin de mieux caractériser et de comprendre d'une part leurs transferts entre les compartiments environnementaux y compris dans la chaîne alimentaire, notamment en lien avec d'autres stressors (pathogènes, variations des conditions climatiques, etc.) qui sont susceptibles d'influer sur les écosystèmes et d'autre part, les relations entre exposition à des sols contaminés et impacts sanitaires.

Il convient également de poursuivre le développement de la recherche sur les sites et sols pollués, pour déterminer l'écotoxicité et les facteurs de bioconcentration de molécules à enjeux environnemental et sanitaire encore peu étudiées, définir les indicateurs et outils de surveillance pertinents, prioriser les molécules d'intérêt ou encore identifier les zones à fortes pressions anthropiques.

Face au constat fait sur le manque de données sur les impacts sur la santé humaine, il convient de s'interroger sur les causes de ce constat et d'apporter des solutions : quels sont les



moyens d'investigations ? Quelles données sont accessibles ? Qui peut y accéder ? Quelles difficultés pour identifier les bons interlocuteurs du côté santé pour accéder aux études/documents ? Existe-t-il un manque et/ou une difficulté d'accès aux registres des données de santé humaine ? Comment mieux considérer les SSP (quelles variables ? pour quels contaminants en priorité ?).

Globalement, il s'agit de pousser à des travaux couplant les sujets environnement et santé en traitant de concert les ERE et ERS et débouchant sur une méthodologie associant des outils globaux et partagés d'évaluation. Tous, lors des discussions, y ont vu un intérêt mais les pistes de travail ou de recherche concrètes doivent être définies par exemple sur la base de questions clés en santé publique et des écosystèmes (sites pollués à enjeux sanitaires identifiés, pressentis ?).

Le développement de l'utilisation de ces outils, notamment dans le cadre de reconversion de friches, devra s'appuyer sur des efforts pour favoriser leur transfert aux bureaux d'études par la réalisation de fiches, formations/logiciels.

Ces perspectives doivent favoriser le développement d'une recherche pragmatique améliorant notre capacité à prédire les impacts des polluants sur les écosystèmes et la santé humaine, par exemple en priorisant la définition de sujets qui répondent à des questions clés associant risques pour la santé humaine et pour les écosystèmes.



Pour en savoir plus

[Indice spatialisé de vulnérabilité : Vidéo Delphine BROUSMICHE](#)

Atelier requalification écologique et économique des sols dégradés



**Laurent THANNBERGER
VALGO**

Christophe SCHWARTZ
Université de Lorraine

Le constat

Depuis des décennies, le secteur des Sites et Sols Pollués (SSP) reste principalement centré sur la dépollution des sols à proprement dit. Celle-ci consiste en une gestion indispensable des contaminants chimiques et en un contrôle de leur risque de dissémination dans l'environnement et vers l'Homme. Cette approche a encore pour objectif principal la valorisation foncière des sites. Il faut toutefois constater que cette dernière décennie a vu progressivement émerger le concept plus large de gestion intégrée

des sites et sols pollués incluant, en aval de la mise en œuvre de procédés de dépollution, une refonctionnalisation ou requalification écologique des sites. Cette approche impose de prendre en compte, au-delà de la contamination des sols, d'autres caractéristiques édaphiques et en particulier les fertilités physique, chimique et biologique, qui sont à la base du fonctionnement de l'écosystème. Les sites et sols pollués sont, alors, aussi à envisager comme étant des ressources potentielles, si l'on tient compte de la valeur agronomique des sols, si l'on

redonne à des terres traitées le statut de matériau valorisable ou si, plus encore, la gestion du site aboutit à une restauration de fonctions écologiques, elles-mêmes à la base de la capacité de l'écosystème à rendre des services écosystémiques. Ces nouveaux modes de gestion viennent alors certainement en réponse aux enjeux liés à l'effondrement de la biodiversité et à la raréfaction des ressources et plus largement à l'artificialisation des sols. Apparaît alors l'opportunité, voire l'obligation, d'innover dans les modes de gestion des sites et sols pollués en intégrant les approches, en couplant les procédés jusqu'à atteindre la refonctionnalisation écologique des sites. Les emboîtements d'approches, de méthodes et de procédés doivent se faire au service du développement de filières, par exemple de production de biomasse, pour donner de nouvelles vocations aux sites requalifiés. Si de nombreux acquis et retours d'expériences sont disponibles depuis une dizaine d'années, des démonstrations supplémentaires de la faisabilité simultanée d'une requalification écologique et économique des sites et sols pollués sont attendues.

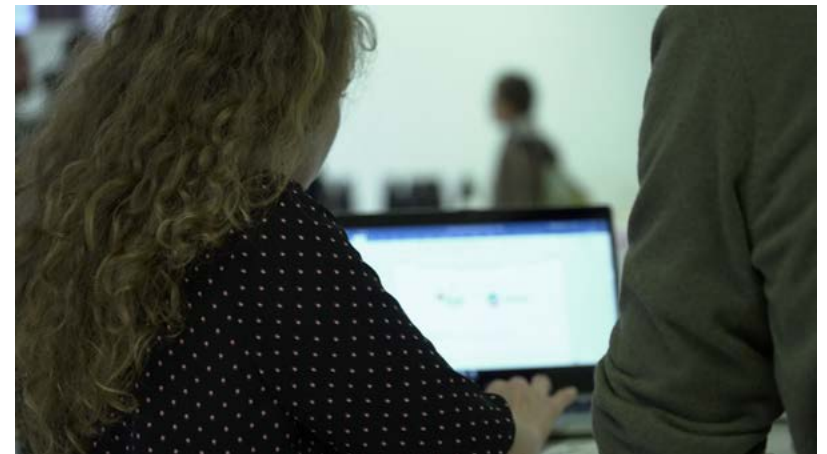
Les acquis présentés

Lors des journées, une série de résultats de recherches finalisées, pour beaucoup réalisées en partenariat académique et industriel, ont permis de présenter un panorama de solutions techniques alliant dépollution des sols

et développement de filières économiques de valorisation des sites. Les procédés envisagés sont issus du génie écologique, avec des déclinaisons parfois couplées du génie pédologique (e.g., reconstitution ou construction de sols) et du génie végétal (e.g., optimisation des choix d'espèces, des itinéraires culturels, obtention de biomasses valorisables, phytomanagement). Les travaux décrits ont très majoritairement trouvé ancrage sur des terrains de démonstration, abordant alors également les enjeux du développement social et économique des territoires.

Si certaines communications amenaient essentiellement des nouveaux concepts pour lesquels peu d'indicateurs d'efficacité écologique et économiques étaient proposés, une majorité des contributions offraient des approches très intégrées avec une évaluation de l'atteinte des objectifs de traitement et de requalification. Si

des procédés physico-chimiques de traitement améliorent indéniablement certaines fonctionnalités des sols, elles en dégradent d'autres. Par exemple, l'oxydation chimique élimine de manière efficace les polluants organiques, tout en affectant considérablement les fonctions biologiques du sol. Les procédés de construction de sol sont alors présentés comme capables de générer des substrats fertiles en optimisant la formulation de matériaux, souvent disponibles localement. Ces procédés de refonctionnalisation post-traitement des sols, déjà développés depuis quelques années, ont donné l'occasion de démonstrations supplémentaires lors des journées, laissant entrevoir une montée en généralité de ces approches. Dans ce domaine, des travaux ont mis en avant le nécessaire perfectionnement d'outils d'aide à la décision et l'adaptation du cadre réglementaire (e.g., gestion des terres excavées).





©Laurent Thannberger et Christophe Schwartz

1. exemple de sols dégradés



©Laurent Thannberger et Christophe Schwartz

2. travaux de réhabilitation



©Laurent Thannberger et Christophe Schwartz

3. sols restaurés

Le lien entre qualité du sol et production de biomasse végétale à vocation non alimentaire a fait l'objet de multiples investigations. Certaines espèces végétales sélectionnées s'accommodent des conditions de culture spécifiques en sols pollués. L'opportunité de réhabiliter une culture ancienne, l'ortie fibre, a ainsi fait l'objet d'une approche très intégrée. Autre exemple, les espèces productrices d'huiles essentielles sont suffisamment diversifiées, pour qu'il soit possible de trouver des candidates adaptées à des situations contrastées de contamination et de fertilité des sols. Un effort reste à faire à l'aval des filières, tant sur l'acceptation sociale d'une production (d'huiles essentielles ou de fibres) sur sols dégradés que sur l'usage des produits qui reste à diversifier. Un constat similaire a été fait pour des espèces végétales ligneuses. Dans ce cas, pour s'adapter aux qualités de sols très variables rencontrées, il est certainement nécessaire d'étoffer la gamme des espèces cultivées. En complément des filières précédentes, l'effet de nouvelles cultures « exotiques » sur des sols de France métropolitaine a été testé de manière innovante, permettant de rebondir techniquement sur le principe de refonctionnalisation, ainsi que de vérifier que les solutions envisagées ne font pas pire que mieux.

Au final, la démonstration a été faite que des leviers majeurs pour une refonctionnalisation écologique efficace des sites résident dans l'adaptation et la transposition d'approches pédolo-

giques et, plus généralement, agronomiques, initialement développée en contextes forestiers et agricoles, dans le contexte des milieux urbains et industriels. Dans les sujets présentés, le sol industriel est ainsi appréhendé de façon systémique, avec différentes fonctions en interaction et non plus simplement juxtaposées. Loin d'ajouter des contraintes de gestion, la prise en considération du sol comme un système vivant et fonctionnel ouvre des perspectives nouvelles en phytomanagement, qu'il faudra faire diffuser à la fois dans l'opinion publique et auprès des décideurs, pour en faciliter l'acceptation.

Les sites et sols pollués ont alors aussi été décrits comme étant des lieux où se déclinent des approches multidisciplinaires, voire transdisciplinaires. Les solutions techniques et les outils proposés sont également à étudier sous un angle social et organisationnel. Plus encore, un projet a proposé une prise en compte de multiples dimensions du sol, liées aux fonctions assurées, aux services (potentiellement) rendus à l'Homme et aux multiples implications sociétales.

Les lacunes

Actuellement, la tendance est de multiplier les études de cas pour le développement de filières de valorisation de biomasses sur des sites dégradés, sans toujours faire clairement état des acquis antérieurs qui sont à capitaliser plus amplement. Il manque alors certainement une production de résultats

à valeur générique, de modèles aptes à décrire des situations contrastées (e.g., sols, climats, espèces végétales) et d'outils d'aide à la décision permettant d'orienter les choix de modes de gestion.

Les perspectives

Si de leur côté, les scientifiques développent largement des concepts et acquièrent de nombreux résultats sur le fonctionnement et la gestion des systèmes atmosphère - sols pollués - eau - plantes, la Société, les populations et tous les opérateurs de la gestion des sites et sols pollués doivent pouvoir se les approprier. L'avenir réside alors nécessairement dans l'augmentation du niveau de maturité technologique des procédés proposés par la recherche. Un nouveau regard devrait alors être porté sur les projets partenariaux entre chercheurs et industriels. Dans ces projets collaboratifs, on constate souvent que les entreprises et opérateurs de la gestion des sites apportent leurs contributions principalement sur les TRL (Technology Readiness Level) élevés, alors que les laboratoires institutionnels élargissent leurs recherches sur des TRL qui restent plus en amont. La clé serait alors de trouver des manières de combler le fossé apparaissant trop souvent entre acquis de recherche et mise en œuvre opérationnelle.

Des priorités d'action sont également à placer dans (i) l'amplification des démarches d'observation pour acquérir des données de référence, (ii) la mise

en place et le suivi sur le long terme de démonstrateurs de terrain dans des conditions contrastées et (iii) le développement d'outils d'aide à la décision pour orienter les modes de gestion et d'itinéraires techniques adaptés aux services écosystémiques attendus. Au-delà de l'intérêt et de l'efficacité écologique des procédés mis en œuvre, il faudra bien évidemment faire la démonstration de leur efficacité et de leur faisabilité sur le plan économique et de leur acceptation sociale. Au-delà de ces aspects, il faudra prendre en compte les interconnexions entre les grands défis que sont les transitions urbaines, énergétiques et écologiques, dans un objectif de contribuer à l'accroissement des connaissances et à l'innovation pour la gestion durable des sites et sols pollués.

Des travaux sont actuellement menés dans ce sens par le Réseau National d'Expertise Scientifique et Technique sur les Sols (RNEST). Son Comité Scientifique, Technique et d'Innovation (CSTI RNEST) est chargé de jouer un rôle d'interface en réunissant porteurs de projets de recherche et acteurs exerçant sur les sols. Il assure une fonction de médiation entre recherche, expertise, valorisation, transfert, diffusion, et innovation, que les acteurs impliqués exercent en particulier dans un contexte urbain et de sites contaminés. Le volet transfert, valorisation et diffusion des missions du CSTI a alors pour objectifs (i) de jouer le rôle de facilitateur du dialogue entre porteurs d'enjeux et acteurs de la recherche/

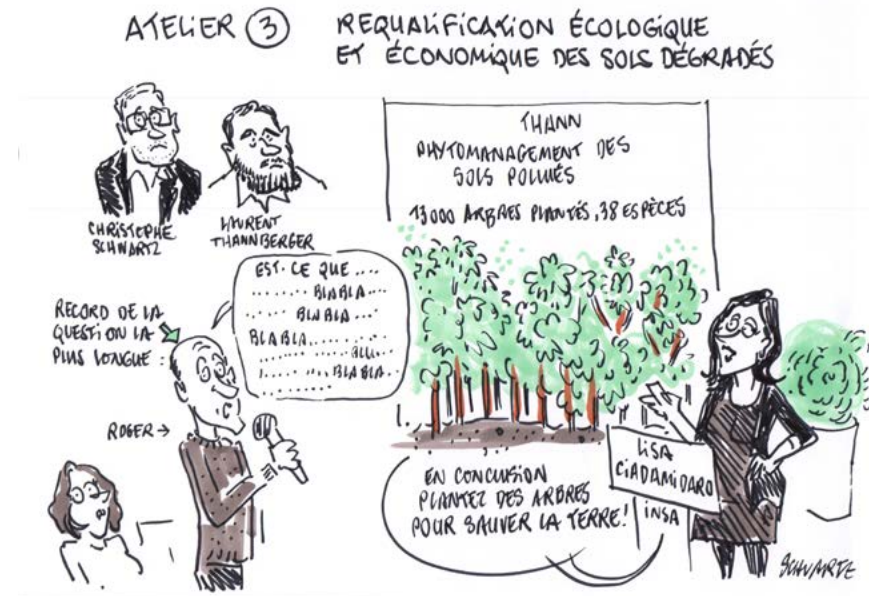
innovation : il est force de proposition pour les activités de valorisation de résultats de la recherche, en particulier auprès des acteurs économiques, des gestionnaires des sols et du grand public ; (ii) de diffuser les besoins et les innovations en provenance des acteurs techniques et économiques de l'innovation auprès des acteurs de la recherche et des politiques publiques. L'ensemble des approches envisagées à l'avenir devra sans conteste tenir compte et anticiper les changements et dérèglements climatiques auxquels les organismes vivants et les sols sont bien évidemment très sensibles.

Pour en savoir plus

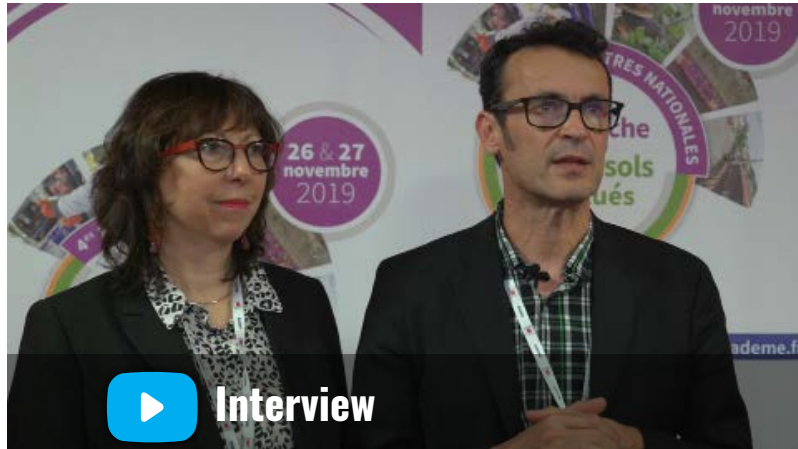
[Réseau National d'Expertise Scientifique et Technique sur les Sols](#)

Guide de valorisation hors site des terres excavées issues de sites et sols potentiellement pollués dans des projets d'aménagement ; MTES/DGPR, novembre 2017

[Journée technique Valorisation et stockage de terres et déchets inertes \(8 nov 2019\)](#)



Atelier utilisation des mousses pour le traitement



Marie-Odile SIMONNOT
Université de Lorraine

David CAZAUX
INOVN

Le constat

De nombreuses méthodes existent pour le traitement in situ des sols et des nappes, mais elles se heurtent parfois à des difficultés en raison de l'anisotropie du milieu, notamment en termes de contrastes de perméabilité ou de mouillabilité. L'utilisation de mousses, inspirée du génie pétrolier, permet de pallier ces difficultés ; depuis quelques années, les mousses connaissent un intérêt croissant dans le domaine de la dépollution. Elles sont obtenues en combinant l'injection de gaz et de tensioactifs et ont

pour fonction soit de répartir les tensioactifs de manière homogène dans le milieu poreux et aider à la récupération de phases non aqueuses (NAPL), soit de faciliter le transport d'un réactif chimique (ex. vectorisation d'un oxydant), soit de bloquer l'écoulement dans un milieu perméable.

En France, elles ont fait l'objet de plusieurs projets de recherche (e.g. SILPHES, MOUSTIC, FAMOUS, Mousse 3D, INNOVASOL), soutenus par l'ADEME, l'ANR ou des entreprises. Ces recherches ont permis d'étudier en

détails, dans des dispositifs 1 ou 2D à l'échelle du laboratoire, la formation des mousses (en fonction du tensioactif et des méthodes d'injection), leur stabilité et leur transport en milieu poreux (selon les tailles de grains, la mouillabilité, la perméabilité etc.) et leur potentiel de vectorisation. Des progrès ont également été faits en modélisation de leur comportement. Enfin, des expérimentations ont également été menées à l'échelle pilote de terrain.

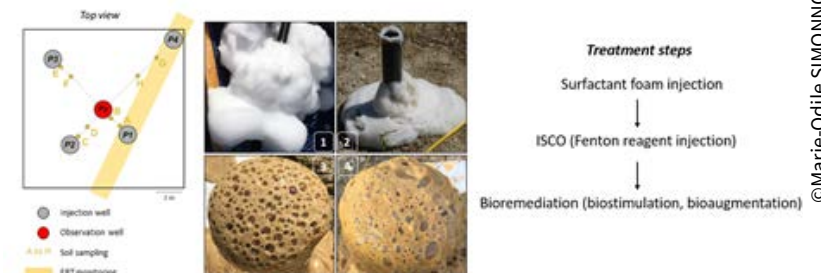
Les résultats mettent en évidence le comportement visqueux, généralement rhéofluidifiant des mousses et leur faible sensibilité à l'anisotropie et la gravité, et leur fonctionnement en zones saturées ou non. Les mousses peuvent être aussi renforcées par des polymères ou des particules. Les résultats démontrent également le comportement en fonction de l'injection et leur intérêt en blocage, récupération et vectorisation. Elles permettent notamment une distribution isotrope de réactifs (oxydants par exemple) dans des milieux anisotropes complexes.

Les lacunes

Il reste à progresser sur un certain nombre d'aspects. En particulier, il faut chercher à atteindre des rayons d'influence élevés (> 5 m), atteindre un régime permanent plus rapidement, limiter la charge organique injectée (en travaillant sur la formulation), optimiser la récupération de phase pure et progresser dans le suivi non invasif



les mousses, du laboratoire au terrain



©Marie-Odile SIMONNOT et David CAZAUX

des fluides de traitement et des NAPL. Concernant la vectorisation, il reste à travailler sur l'évaluation et la distribution de réactifs efficaces pour neutraliser des polluants persistants.

Les perspectives

Les recherches doivent s'orienter vers la formulation des mousses et des réactifs vectorisés, et l'optimisation des procédés cités précédemment (récupération de phase pure, blocage,

vectorisation). Il s'agit notamment de chercher à utiliser des formulations tensioactives à faible charge organique, fonctionnant au voisinage de la concentration micellaire critique (CMC) et le plus biodégradables possible. Il est essentiel de consolider les résultats à l'échelle du terrain, et de progresser encore dans la modélisation.

Pour en savoir plus

[Bouzié I., Développement d'une méthode à base de mousse pour la distribution améliorée d'oxydant dans des sols insaturés contaminés par des hydrocarbures. Thèse de doctorat \(2019\) Bourgogne Franche-Comté.](#)
[Maire, J. Développement de techniques pour la remédiation d'aquifères pollués par des composés organochlorés. Thèse de doctorat \(2019\) Bourgogne Franche-Comté](#)
[Projet SILPHES : Video FATIN-ROUGE](#)



Atelier place des sols dans la ville durable



Georges GAY
Université de Saint-Étienne

Laurent CHATEAU
ADEME

Le constat

Les travaux de l'atelier s'inscrivaient dans le thème 5 de l'appel à communication portant sur villes et territoires durables, scindé lui-même en deux axes, l'un consacré à une approche durable des techniques de traitements et l'autre à une approche territoriale englobant pratiques d'aménagement, de communication et de concertation, et cadrage juridique et financier. Dans cette perspective, l'enjeu principal de l'atelier était l'exploration du passage d'une approche technique de nature quantitative dont l'évaluation repose sur la mesure des résultats, à une ap-

proche plus qualitative et globale intégrant des paramètres de nature sociétale, évaluée en termes de bénéfices fonctionnels et de capacités d'application. Il s'agit alors d'envisager le sol non simplement comme foncier, support neutre d'activités, de constructions ou d'équipements mais dans la diversité de ses qualités et potentialités de restauration et d'usage. Cette démarche suppose une ouverture disciplinaire qui, à côté des apports des sciences expérimentales, prenne en compte le point de vue des sciences sociales.

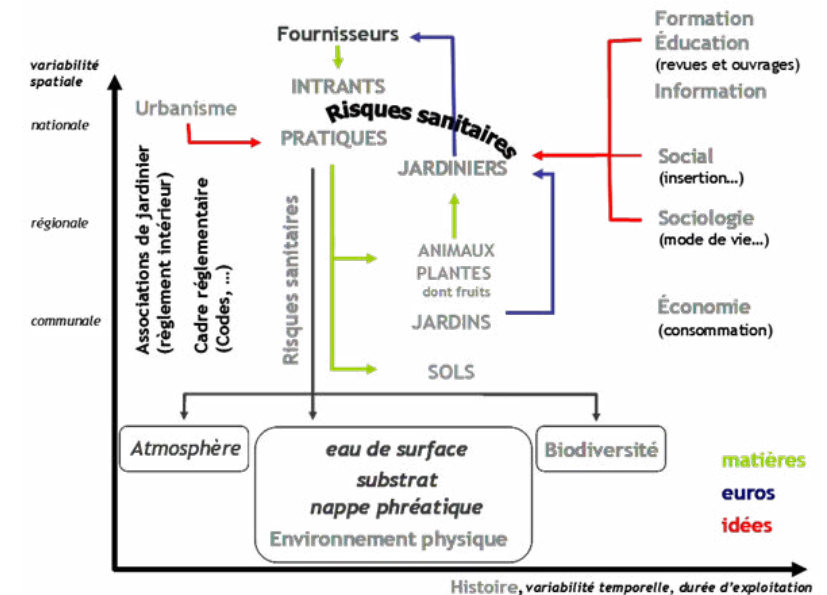
Sur les neuf communications présentées cinq restent dans le cadre d'une démarche technique proposant la construction d'indicateurs et d'outils d'aide à la décision, quatre se placent dans une perspective pluridisciplinaire confrontant les constats d'ordre biologique, chimique ou physique à la question des usages sociaux.

Les communications relevant de la démarche technique recouvrent deux types d'apport : d'une part la mise en place de méthodes et d'indicateurs permettant de mieux connaître l'état des sols et d'affiner les démarches de réhabilitation en fonction des usages envisagés et d'en assurer le suivi, d'autre part des méthodologies de diagnostic, soit pour éclairer les choix d'orientation d'aménagement en fonction des enjeux soit en amont des interventions, portant sur la connaissance du fonctionnement des sols et des fonctions et services rendus par ceux-ci pour en améliorer la gestion.

Les communications à caractère pluridisciplinaire, prenant en compte la question des usages sociaux, ont en commun de remettre au centre des démarches d'aménagement et de production de l'urbain, le paramètre de la qualité des sols, des fonctions qu'ils assurent et des services qu'ils rendent. Ceci se fait tout d'abord par le questionnement de l'écologisation des pratiques d'aménagement et de ses modèles de référence (agriculture urbaine, renaturation...). Les commu-

nications adoptant cette démarche invitent à replacer les caractéristiques physico-chimiques des sols au cœur des pratiques d'aménagement tout en rappelant la nécessité d'un dialogue avec les acteurs sociaux que ce soit pour en apprécier de façon pertinente les conclusions à tirer de leur nocivité éventuelle ou pour en préciser les potentialités à partir d'une connaissance partagée de leurs usages passés, présents et à venir.

Le retour sur des expériences de traitement de friches urbaines participe d'une seconde approche de cette prise en compte des fonctions et services des sols dans les démarches d'aménagement que ce soit par l'accent mis sur la prise en compte des fonctions dans l'élaboration des scénarios d'aménagement ou, indirectement, par la manière de traiter les espaces en attente en vue d'une biodiversité maîtrisée.



Source : Douay, F., Marot, F. et Schwartz, C. Jardins potagers : retour sur 30 ans de recherche en connaissance, évaluation et gestion des impacts. In « Recueil des résumés - ATELIER 7 - [Place des sols dans la ville durable] - Rencontres Nationales de la Recherche sur les Sites & Sols Pollués. Novembre 2019 »

Les lacunes

Les principales lacunes ressortant de ce constat portent sur deux points, thématique d'une part, méthodologique d'autre part. Sur un plan thématique, il apparaît que la question sanitaire qui est parfois approchée à travers la problématique de la contamination des végétaux potentiellement consommés, mériterait d'être approfondie que ce soit en termes d'évaluation du risque et d'élaboration de démarches de prévention ou en termes de santé publique (bilan coût/avantage des mesures de prévention).

Sur un plan méthodologique, si l'environnement sociétal est souvent évoqué voire invoqué, son approche demande à être renforcée par un recours plus systématique et plus central aux sciences sociales qui ne doivent pas rester dans un rôle d'auxiliaire de la démarche expérimentale mais se placer au contraire dans une posture anticipatrice de celle-ci.

Par ailleurs, il s'avère que les aspects sanitaires et écologiques restent abordés de manière cloisonnée et mériteraient d'être réconciliés pour avoir une réponse globale (en termes de potentialités des sols, des sites, des risques, etc.).

Les perspectives

Si, globalement, le renforcement de la prise en compte des fonctions et des services éco-systémiques des sols apparaît comme la perspective majeure

qui se dégage du constat précédemment établi, celle-ci peut se décliner en trois orientations.

Sur un plan méthodologique tout d'abord, il apparaît nécessaire de tendre vers une homogénéisation des données et une uniformisation des méthodes d'évaluation par la construction d'outils d'intégration globaux, associant, entre autres données sanitaires et données environnementales

Sur un plan pratique il convient d'aboutir à la mise en place de guides à l'usage des aménageurs et des gestionnaires des sols intégrant la perspective sociétale dans la prise en compte de ses différentes dimensions (besoins, usages et demande sociale).

D'une manière générale l'amélioration des connaissances sur la diversité des sols et de leurs potentialités apparaît comme une nécessité tandis que la prise en compte de la dimension économique dans l'évaluation des services rendus ouvre une piste prometteuse pour la mise en œuvre des démarches de requalification et d'aménagement.



Pour en savoir plus

[Jardins potagers - Retour sur 30 ans de recherche en connaissance, évaluation et gestion des impacts. ADEME, Note de synthèse. Novembre 2019.](#)

[RECORD, Mesure de la biodiversité et évaluation des services écosystémiques des milieux restaurés. Méthodes et retours d'expériences, rapport de synthèse, Juin 2018](#)

[Méthodologies d'évaluation des fonctions et des services écosystémiques rendus par les sols. ADEME, Note de synthèse. Novembre 2019.](#)

[Friches urbaines disponibles et biodiversité : Vidéo Guillaume LEMOINE](#)

[Thèse Anne Blanchart](#)

[Les supers pouvoirs des sols](#)

M., Canavese, M., Petit-Berghem, Y., Rémy, E. (2017). « L'agriculture urbaine » : concept scientifique ou modèle d'action ? Une notion mise à l'épreuve par le jardinage et le sol urbains. Géographie et cultures, numéro spécial « Cultiver la ville : de la diversité des pratiques et des formes d'appropriation citoyennes (sous la direction de Florence Brondeau), L'Harmattan-CNRS, 101, 119-138.

Atelier transfert dans les milieux 1



Bernard COLLIGNAN
CSTB

Jean-Marie CÔME
GINGER-BURGEAP

Le constat

Nous sommes face à des enjeux sociaux, économiques et environnementaux pour la ré-appropriation des sites et sols pollués afin notamment de lutter contre l'étalement urbain en vue de se rapprocher d'un objectif de « zéro artificialisation nette » des sols en France à l'horizon 2050, dans un double perspective, de préservation de la biodiversité (Plan biodiversité, 07/2018) et de neutralité carbone (Loi Énergie/Climat, 11/2019). L'objectif est alors de pouvoir ré-utiliser des friches

industrielles dans une logique urbaine dans des conditions sanitaires satisfaisantes.

Dans ce contexte, cet atelier s'est focalisé sur deux problématiques dont les enjeux clés peuvent être résumés comme suit :

- Évaluer les transferts gazeux dans les sols et des sols vers les bâtiments, leurs impacts et définir les mesures constructives associées. Ces évaluations nécessitent la compréhension des transferts des sols vers les environnements extérieurs et intérieurs permettant le dévelop-

pement d'outils et méthodes de caractérisation appropriés pour les EQRS et les études d'impacts. En parallèle, il s'agit d'être capable de protéger des futurs bâtiments en complémentarité de gestion vis-à-vis de pollution résiduelle, notamment au regard des incertitudes de caractérisation existantes ;

- Évaluer le devenir dans les eaux souterraines de deux familles de polluants : les CAP-O (Composés aromatiques polycycliques oxygénés) et les chloroéthènes. Les deux enjeux principaux concernent d'une

part la caractérisation et le transfert dans les sols et eaux souterraines des CAP-O, et d'autre part le développement des outils isotopiques et de biologie moléculaire pour évaluer la dégradation des COHV dans les eaux souterraines.

Concernant les travaux sur les transferts gazeux, les résultats clés ont porté sur :

- L'étude de la variabilité spatio-temporelle des transferts (multi paramètres parfois instationnaires, phénomènes physico chimiques complexes).

- Le développement d'outils de caractérisation des impacts des pollutions gazeuses des sols sur la Qualité d'Air Intérieur (QAI)

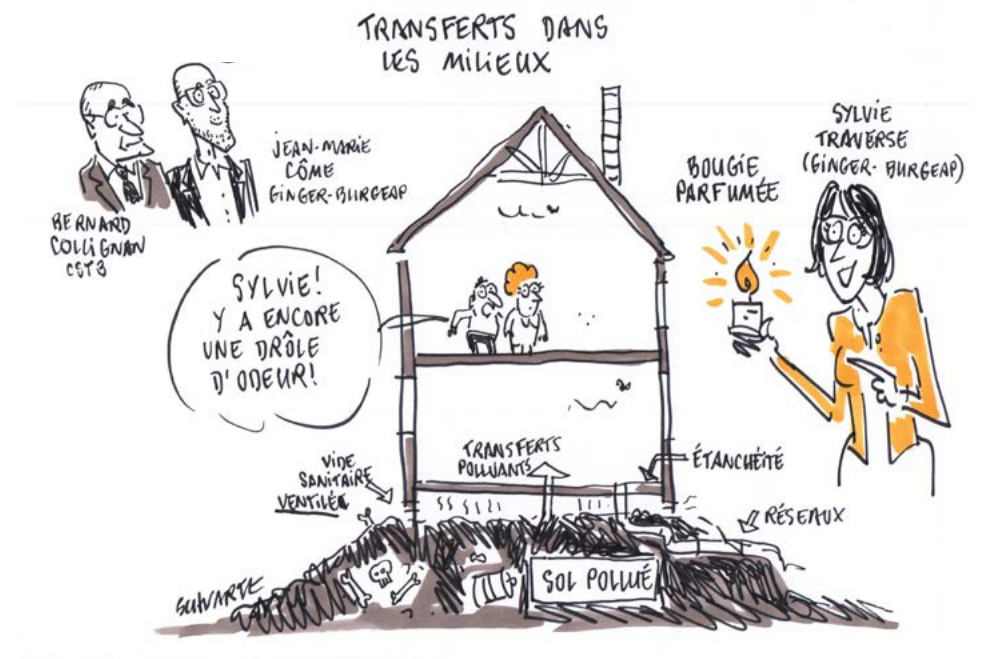
- Un état des lieux des moyens de protection des bâtiments vis-à-vis de ces pollutions gazeuses,
- Le développement et évaluation des performances mécaniques de méthode innovante de protection des bâtiments

Concernant les travaux sur les transferts gazeux, les résultats clés ont porté sur :

- Le résultat clé des travaux présentés sur ce volet de l'atelier semble être que la migration des CAP-O se fait majoritairement sous forme dissoute (vs sous forme colloïdale et particulaire), ce qui a des conséquences importantes sur les stra-



© Bernard COLLIGNAN et Jean-Marie CÔME



tégies d'échantillonnage et d'analyse.

- Un autre résultat important concernant les CAP-O est la mise en évidence d'un paramètre de disponibilité qui pourrait être inclus dans la loi de Raoult pour prédire la mobilisation dans les sols ayant subis les effets du « aging »
- Pour les chloroéthènes : la mise en évidence de l'intérêt des biomarqueurs qui apportent une connaissance fine des métabolismes microbiens présents sur le site
- La mise en œuvre des méthodes « omiques » pour les chloroéthènes afin d'évaluer l'efficacité de la stimulation de différents substrats organiques et pour aider au pilotage de la biodegradation des chloroéthènes dissous.

chloroéthènes dans les eaux souterraines qui ressortent des travaux présentés sont les suivantes :

- Le développement d'une méthode de mesure de la disponibilité des CAP-O
- Le développement d'approches prédictives par analogie de structure chimiques des composés type « QSAR » et d'expérimentations en vue d'estimer la toxicité des CAP-O
- L'utilisation des résultats du projet BIODISSPOL pour optimiser les traitements
- Construire des corrélations genres/fonctions et autres indicateurs « classiques » (chimie, qPCR) à partir des

Les perspectives

Les perspectives principales concernant les transferts gazeux qui ressortent des travaux présentés sont :

- D'améliorer l'intégration des mesures temporelles des gaz des sols,
- De poursuivre les tests, notamment in-situ des outils de caractérisation des impacts des polluants gazeux des sols sur la QAI,
- De poursuivre les tests, notamment in-situ sur les moyens de protection des bâtiments afin de conforter et mieux spécifier leurs performances,
- De développer l'appropriation par la chaîne des professionnels des moyens de protection des bâtiments.

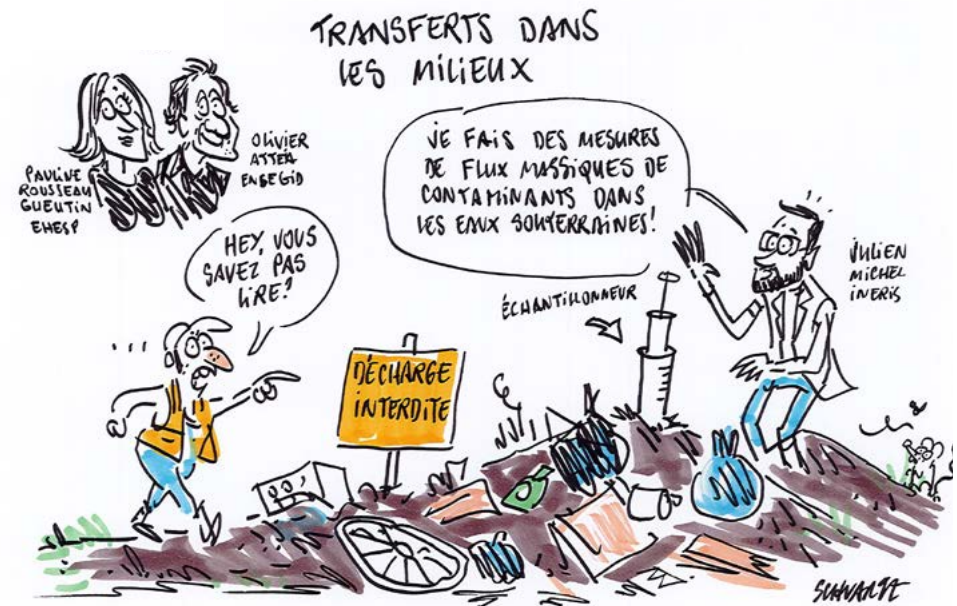
Les perspectives principales concernant les transferts des CAP-O et des

Atelier transfert dans les milieux 2



Pauline ROUSSEAU-GUEUTIN
EHESP

Olivier ATTEIA
ENSEGID



résultats des essais laboratoire et de terrain en vue de produire du retour d'expérience et des recommandations opérationnelles.

Dans la recherche sur les sites et sols pollués, la compréhension des transferts des polluants dans les milieux est nécessaire. Cet atelier a plus particulièrement porté sur la caractérisation et l'estimation, dans l'espace et le temps, des NAPL dans la zone non-saturée (milieux air-sol-eau) et la zone saturée (milieux eau-roche). La représentation plus importantes de recherche sur la caractérisation des sources que sur les transferts sensu stricto révèle un besoin toujours aussi important de recherche de l'identification et la quantification des sources.

Les acquis présentés

Les résultats présentés s'articulaient autour de trois approches, les mesures de concentrations, les mesures de flux et la modélisation.

La mesure reste très importante et de nouvelles techniques sont nécessaires avec des développements en cours. Par exemple, l'utilisation des variations d'épaisseur de NAPL sur puits ou les teneurs résiduelles en NAPL selon la profondeur. Des nouvelles méthodes d'échantillonnage sont développées afin d'améliorer la quantification des NAPL en limitant la perte de matière lors des prélèvements. Une approche d'échantillonnage par cryogénie est ainsi développée pour limiter ces verrous. Ces mesures sur les NAPL augmentent significativement

la compréhension de l'organisation des NAPL dans les zones saturée et non saturée. Des approches complémentaires comme par exemple l'utilisation de la concentration en ^{222}Rn peuvent aussi préciser la quantité de NAPL dans le sol. Les précédentes approches permettent une meilleure estimation de la quantité de NAPL présente dans le sous-sol, mais ne permettent pas d'avoir d'estimation des flux de matière. Pour répondre à ce besoin, des mesures de flux se développent, cependant pour l'instant, bien que les résultats semblent prometteur, il est difficile d'avoir un juge de paix lors des comparaisons. La modélisation évolue dans différentes directions, il semble possible d'adresser des problèmes très différents (NAPL, gaz...) et des échelles différentes (centimétrique à kilométrique). Les développements concernent à la fois l'applicabilité sur des problèmes réels comme l'épaisseur de flottant, la diffusion du Radon ou la recherche de zone source ainsi que leur durée d'impact. A cela s'ajoute la prise en compte des incertitudes dans ces modélisations. Il semble que de plus en plus la modélisation s'oriente vers des sites réels. Des outils d'aide à la décision

basés sur des modélisations sont également développés comme aide à la décision pour positionner des puits d'observation ou bien des puits de traitement sur un site particulier. Ces outils permettent également de tester différentes méthodes de dépollution pour évaluer leur efficacité et coût sur le site visé.

Les lacunes

Sur la mesure, NAPL et flux, des développements probants ont été obtenus sur un site, il reste à démontrer leur pertinence sur d'autres sites pour une applicabilité plus générale. Les besoins de caractérisation des quantités de contaminant sur les zones sources sont encore forts. Les premiers résultats montrent une nécessité de continuer à investiguer ces approches tout en complexifiant les lithologies sur lesquelles ces premiers résultats ont été obtenus. En ce qui concerne les estimations de flux massiques, il semble à l'heure actuelle nécessaire de continuer le développement de ces mesures afin d'avoir des données robustes et reproductibles.

Les perspectives

Plusieurs résultats prometteurs, comme les modèles Rn et zone source (localisation

et durée) fonctionnent sur un cas et doivent être appliqués à d'autres situations plus complexes. Toutefois, l'estimation des incertitudes requiert une simplification des modèles. Sur les zones sources, des modèles simplifiés semblent permettre de préciser la position et la durée de vie des zones sources, en tenant compte des incertitudes. Un travail global sur la simplification des modèles pour une meilleure applicabilité est envisageable, y compris sur des sites moyennement instrumentés. La modélisation doit aller à l'échelle pluri-métrique et travailler sur les systèmes hétérogènes tout en intégrant des aspects du transport multi-phases ainsi que des réactions géochimiques. L'ensemble des études présentées sont développées pour une échelle particulière, une réanalyse de différents projets multi-échelles détaillée serait utile pour préciser s'assurer que toutes les échelles auxquelles se fait le transport sont bien investiguées.

Pour en savoir plus

[Projet BATICOV](#)

[Projet CAPQAI](#)

[Projet EFEMAIR](#)

[Projet EVALSDS](#)

[VirtualDepoll : simulation en ligne de la caractérisation aux tests de scénarios de traitement, Olivier ATTEIA, ENSEGID](#)



[Collignan B., Powaga E., Abadie M., Chastanet J., Grasset M., Hulot C., Traverse S. \(2018\). Projet CAPQAI. Méthodologie de caractérisation des sols pollués pour l'évaluation de leur impact sur les expositions intérieures dans les bâtiments.](#)

[Collignan, B., Allard, F., Romani, Z., Abadie, M., Nicolle, J., Peigné, P., Druette, L. \(2018\). Recommandations pour la réalisation d'un système de dépressurisation des sols à fonctionnement naturel, de la conception à la maintenance. Guide pratique du projet EVALSDS, convention ADEME n°1572C0199, 33 p.](#)

[État des lieux et axes d'amélioration de la programmation à l'exploitation des bâtiments. Projet BATICOV Collection Expertise ADEME. Novembre 2017. 92 pp+ annexes <http://www.burgeap.fr/index.php/fr/innovations/methodologie/baticov>](#)

[Traverse S., Cessac C., Collignan B., Côme J.M., Desrousseaux M., Grasset M., Hulot C., Raoust M. \(2018\). Projet BATICOV. Mesures constructives vis-à-vis des transferts de pollutions volatiles du sol vers les bâtiments. Outils méthodologiques de la programmation à l'exploitation des bâtiments. Collection expertise ADEME. Novembre 2017. 58 pp](#)



Atelier outil de caractérisation



Roger JACQUET,
SOLVAY

Hubert LÉPROND,
BRGM

Le constat

La bonne gestion d'un site pollué découle directement d'une caractérisation préalable pertinente et suffisante. Le sous-sol étant une boîte noire, il faut donc s'attacher à comprendre son fonctionnement (c-a-d construire le schéma conceptuel) afin de pouvoir correctement identifier les sources de pollution, les voies de transferts, estimer les risques liés aux polluants afin de définir les mesures de gestion permettant de réduire et contrôler l'exposition des cibles humaines ou environnementales. La caractérisation d'un site et, le cas échéant, de son environ-

nement est donc une étape clef pour sécuriser des travaux de réhabilitation et optimiser leur coût. En effet, les conséquences financières mais plus particulièrement en terme de réalisation d'un chantier (respect des délais, découvertes en cours de travaux, ...) sont sans commune mesure avec la réalisation de quelques investigations et mesures complémentaires pendant la phase de diagnostic. Différentes questions se posent comme :

- Qu'est-ce qu'une caractérisation suffisante ?
- Quand l'arrêter pour passer à l'étape suivante en minimisant les décou-

vertes en phase travaux ?

- Quel est le meilleur outil disponible par rapport à mon contexte ?

L'atelier a donc pour enjeu principal de balayer les pistes de progrès étudiées depuis quelques années sur ces phases de diagnostic et sur les différentes matrices susceptibles d'être mises en jeu.

Les acquis présentés

Tout d'abord, l'intégration et la présentation des nouveaux outils arrivant à maturité dans la méthodologie nationale de gestion en avril 2017 a été un véritable catalyseur pour faciliter l'émergence de nouveaux outils de diagnostics. Depuis sa publication, il peut être constaté une certaine « démocratisation » de certaines approches (dentochimie / phytoscreening, drone, ...), c-à-d leur intégration dans les pratiques et leur pénétration dans le marché. Les mises en œuvre sur site se généralisent avec notamment le développement des outils numériques :

- Cartographie / photographie ;
- Géophysique ;
- Géostatistiques.

L'atelier a donc montré par différents retours d'expérience qu'il existe de multiples outils de caractérisation utilisables dès à présent sur le terrain avec une bonne fiabilité. Les outils déployés permettent également de travailler à différentes échelles que ce soit pour améliorer la précision des mesures de terrain jusqu'à la caractérisation de sites de plusieurs dizaines à centaines d'hectares.

Même si les approches présentées sont très diverses, globalement, plusieurs tendances se dessinent :

- Le rapprochement du laboratoire au terrain avec des couplages mesures / analyses ;
- L'interprétation des données en temps réel ;
- La combinaison des outils : approches classiques (échantillonnage et analyses en labo) / outil portable ou labo mobile. Sur ce point, les recherches ont visé à l'amélioration de la mobilité des outils, de leur précision mais aussi à l'intégration de nombreuses fonctionnalités : coordonnées GPS,



visualisation immédiate des résultats, intégration d'analyse statistique ou géostatistique ;

- L'émergence de nouvelles approches : méthodes géophysiques / analyse de biologie moléculaire (génomique, ...) / Imagerie aérienne (suivi de végétation, topographie, hydrologie, zone d'érosion ou de dépôt de sédiments...).

Les lacunes

Si l'atelier a permis de passer en revue différentes techniques d'investigations déployées dans la thématique SSP (par exemple : géophysique, drone, phytoscreening, ...), il n'y a pas d'innovation technologique de rupture qui pourrait révolutionner le domaine dans ses approches. En revanche, la multiplicité des outils et le croisement des méthodes sont de nature à combler un certain nombre de lacunes.

De même, il peut être regretté que des outils nouveaux dédiés aux contaminants dit « émergents », micropolluants

ou composés plus exotiques type (HCH etc.) n'aient pas été présentés au cours de l'atelier. Plusieurs hypothèses sur ce constat peuvent être émises par rapport aux enjeux qui restent encore principalement sur les composés les plus fréquemment rencontrés. Cette lacune peut être due, par exemple, au manque de connaissance et donc d'in-

térêt à rechercher ces nouveaux composés dès le stade des études. Cela peut aussi s'expliquer par la taille des marchés associés à ces composés qui peut freiner le développement de nouveaux outils (marché de niche = faibles moyens de recherche et développement mobilisés).

Les perspectives

L'atelier « Outil de caractérisation » a permis d'entrevoir différentes perspectives qui ne sont pas toutes orientées / centrées sur des aspects techniques :

- Poursuivre la démocratisation des recherches et les transferts vers l'utilisation opérationnelle des outils développés. Si des événements tels que les Journées de la Recherche de l'ADEME permettent d'éclairer certains acteurs du domaine à de nouvelles approches, des actions complémentaires et plus ciblées sont nécessaires, peut-être vers certaines typologies d'acteurs (donneurs d'ordre, administrations, etc.) ;
- Encadrer les protocoles utilisés et les résultats pour faciliter leur appropriation et le positionnement des parties prenantes (notamment l'administration). Ce point découle directement de la première perspective identifiée. L'objectif est d'éviter la sensation de boîte noire et d'être pédagogue dans les restitutions ;
- Capitaliser encore davantage des retours d'expérience basés sur des croisements de méthodes de caractérisation d'un site (par exemple approches

par phytoscreening et géophysique), ceci afin de les confronter à un diagnostic classique (davantage orienter sur la chimie) et démontrer encore davantage leur intérêt mais aussi leurs limites. Un des objectifs serait également de consolider les aspects propres au coût de ces nouveaux outils à partir de cas réels.

D'un point de vue technique, les développements envisageables sont nombreux et pourraient concerner, par exemple :

- La caractérisation des émissions de gaz du sol (radon, Hg°, méthane, ...) à l'aide de capteurs installés sur un appareil aéroporté (ULM / drone, ...). Cette technologie pourrait être utile pour le suivi d'installations en activité (notion de prévention d'un accident) et pour la réhabilitation de friches (grandes étendues, accès restreint, ...). Les perspectives de marché s'étendent bien au-delà des sites et sols pollués avec la surveillance de sites en fonctionnement ;
- Le test et l'adaptation des nouveaux outils aux polluants dit « émergents » ou composés plus « exotiques » : PFOS / PFAS, 1,4-dioxane, HCH, etc.



Pour en savoir plus

[Guide PIT](#)

[Composés chlorés cernés par les arbres : Vidéo MICHEL CHALOT](#)

[Analyseur LIBS portable-projet ESOPOL : Vidéo Karine MICHEL](#)

[Projet BIOXYVAL](#)

[Projet SILPHES](#)

[Projet EFEMAIR](#)

Atelier traitements biologiques et phytomanagement



Interview

Patrick CHARBONNIER
LUXCONTROL

Olivier FAURE
École des Mines de
Saint-Étienne

Le constat

Les problèmes croissants de pollutions des sols, pointés du doigt dès le milieu des années 80, ont stimulé l'essor d'entreprises spécialisées dans les travaux de dépollution. Les premières solutions proposées, principalement basées sur l'excavation et la mise en décharge des terres polluées («dig and dump» des anglo-saxons), même si elles sont encore régulièrement utilisées aujourd'hui, ont toutefois rapidement trouvé leurs limites, tant pour des raisons économiques que pour des considérations écologiques. À ces premières actions de dépollution

de sites, souvent réalisées dans l'urgence, et uniquement basées sur des approches «travaux publics», ont alors progressivement succédé des technologies plus sophistiquées, visant à dépolluer les sols et à les conserver, plutôt qu'à les orienter vers les filières «déchets». C'est ainsi que de nouvelles méthodes, basées sur des traitements physico-chimiques, figurent aujourd'hui en bonne place dans la trousse à outils des entreprises de dépollution. Citons par exemple, et de façon non exhaustive, les techniques de lavage des sols, de désorption thermique ou d'oxydation in situ (abor-

dées dans d'autres ateliers). Si ces approches, de «seconde génération», ont l'avantage de conserver le sol en tant que ressource ou support pour des activités humaines, elles présentent néanmoins l'inconvénient de restituer un sol dégradé, appauvri en matière organique, dépourvu d'organismes vivants et ayant perdu nombre de ses fonctions écosystémiques.

C'est dans ce contexte que se développe, depuis le début des années 2000, une «troisième génération» d'approches, visant non seulement à dépolluer les sols tout en les conservant, mais aussi à préserver leur biodiversité et les services écosystémiques qu'ils peuvent rendre. Ces méthodes de dépollution douce («gentle remediation options») sont basées sur l'utilisation de plantes supérieures, de microorganismes (bactéries et/ou champignons), ou d'associations plantes supérieures / microorganismes, afin d'extraire ou d'immobiliser les éléments traces potentiellement toxiques et/ou de dégrader différents types de polluants organiques. L'objectif de l'atelier 11 était de faire le point sur les avancées techniques et méthodologiques de ces approches de traitements biologiques. À noter que cette thématique avait été abordée lors des 3^{es} Rencontres de la Recherche sur les SSP de novembre 2014, dans le cadre des ateliers 4 («Approche durable de la dépollution») et 7 («Phytotechnologies pour la gestion des risques»). À cette occasion, l'accent avait principalement

porté sur le phytomanagement des sols pollués par des éléments traces (phytostabilisation, phytoextraction, refonctionnalisation d'espaces dégradés, valorisation de la biomasse). Les Rencontres de 2019, ont élargi cette thématique à la problématique des polluants organiques et à l'utilisation de microorganismes, utilisés seuls ou en association symbiotiques avec des végétaux. Les résultats de huit travaux issus de la recherche académique ou industrielle ont fait l'objet de communications orales. Cinq d'entre eux concernaient la biodégradation de polluants organiques, trois d'entre eux la phytoextraction d'éléments traces

et peuvent être théoriquement entièrement minéralisés par les activités microbiennes du sol, un certain nombre d'entre eux sont réfractaires à la biodégradation et peuvent persister de nombreuses années dans l'environnement. Ces polluants organiques persistants (POPs), tels que les HAPs, PCBs, PCDD/F, etc. peuvent toutefois être métabolisés par un certain nombre de microorganismes du sol (champignons et bactéries). Ces microorganismes, qui peuvent agir seuls ou sous forme de consortium d'espèces, sont cependant mal connus et peu de taxons ont à ce jour été isolés. Dans ce contexte, les travaux présentés dans l'atelier ont mis



© Marie-Odile SIMONNOT

métalliques. Par ailleurs, onze présentations par poster ont complété ces communications.

Le premier axe thématique de cet atelier concernait la biodégradation des polluants organiques. De fait, si par définition les polluants organiques sont potentiellement biodégradables

l'accent sur l'importance d'identifier, de sélectionner et de caractériser des souches bactériennes et fongiques, qui pourraient être exploitées pour la biodégradation des principaux POPs. Les démarches adoptées consistent à étudier des sites historiquement pollués, sur lesquels la pression de sélection

tion exercée par les polluants pourrait avoir favorisé le développement de souches compétentes. Les approches retenues sont basées à la fois sur des méthodes «classiques» de cultures sur milieux sélectifs et sur des techniques de biologie moléculaire visant à caractériser la biodiversité taxonomique et fonctionnelle des microorganismes du sol. Les résultats obtenus, même s'ils sont encore préliminaires, sont encourageants et plusieurs souches ont d'ores et déjà été identifiées. Les capacités de biodégradation de deux champignons ascomycètes (*Fusarium solani* et *Sordaria fimicola*) vis-à-vis respectivement des HAPs et des PCBs,

terrain. Ces molécules sont en effet généralement relativement hydrophobes et donc difficilement accessibles par les microorganismes, qui puisent leurs éléments nutritifs dans la solution du sol. Plusieurs présentations se sont focalisées sur cet aspect, ainsi que sur celui de la biodégradation en milieux extrêmes (pH >>10 et fortes concentrations en polluants). Des essais pilotes sont en cours d'études et des solutions commerciales sont d'ores et déjà entrevues (malaxages des terres, ajouts de biosurfactants, etc.). Le second axe thématique abordé dans cet atelier concernait la problématique des éléments traces métal-



Patrick Charbonnier, Luxcontrol

sont actuellement en cours d'étude. Au-delà du problème de la biodégradation des POPs, se pose également celui des polluants organiques considérés comme «facilement» biodégradables en conditions de laboratoire, mais faiblement biodisponibles sur le

liques. Ceux-ci ne sont évidemment pas biodégradables et les approches de phytomanagement ne peuvent que proposer de les stabiliser in situ (phytostabilisation) ou de les extraire, en utilisant des espèces végétales à fortes capacités d'accumulation et tolérant

leur toxicité (phytoextraction). Les approches de phytostabilisation, présentées dans plusieurs posters, s'orientent très clairement vers des stratégies de revalorisation économique des sols traités, en alliant diminution du risque de transfert des polluants et débouchées commerciales de la biomasse produite (biomasse énergie, huiles essentielles, fibres, etc.). En ce qui concerne la phytoextraction, deux objectifs principaux sont ressortis des présentations : i/ améliorer les capacités d'extraction d'espèces hyperaccumulatrices, à l'aide de champignons endophytes mycorhiziens (projet Endoextract) ou par des pratiques de co-culture en présence d'espèces productrices d'une biomasse valorisable



(projet Phytoexco) et ii/ mettre en place des procédés chimiques basés sur les principes de l'hydrométallurgie, permettant une récupération et une valorisation économique des métaux extraits par les plantes et notamment des métaux d'intérêt stratégique et des terres rares. Cette stratégie innovante, qualifiée «d'agromine», a été présentée comme un moyen prometteur pour obtenir des métaux à haute valeur ajoutée, par des méthodes respectueuses de l'environnement tout en revégétalisant des espaces dégradés.

Les lacunes

Les travaux présentés lors de cet atelier, oralement ou sous forme de poster, sont essentiellement issus

d'études académiques de laboratoire ou, au mieux, de quelques essais pilotes, mais, en l'état, aucune application commerciale «à grande échelle», sauf exception (start up Econick), n'a été rapportée. Pour autant les méthodes de traitement biologiques, si elles sont désormais regardées avec intérêt par les bureaux d'études et les professionnels de la dépollution, présentent encore un certain nombre de verrous qui représentent autant d'incertitudes quant au succès des travaux engagés. En premier lieu, la plupart des situations rencontrées sur le terrain, correspondent à des pollutions mixtes, associant des molécules organiques variées et des éléments traces, dans des conditions pédogéo-

chimiques pouvant être extrêmement diverses. Par conséquent, l'efficacité de microorganismes compétents (ou végétaux supérieurs) sélectionnés sur un site particulier, ne peut être garantie, a priori, pour une application sur un autre site ; la mise en place systématique d'essais pilotes avant le dimensionnement définitif du projet reste donc indispensable. Il est donc nécessaire de favoriser les retours d'expérience et de les partager, afin de diminuer les incertitudes et de «sécuriser» les propositions de traitement. En second lieu, qu'il s'agisse de dégrader des polluants organiques, d'extraire des éléments traces ou de les stabiliser, le problème de leur biodisponibilité est au cœur du projet. Comme souligné dans les discussions menées dans l'atelier, le développement de méthodes permettant non seulement d'évaluer mais aussi de modifier (augmenter ou diminuer) la biodisponibilité des divers polluants organiques et des éléments traces reste une nécessité. Enfin, l'utilisation des méthodes de phytostabilisation et de phytoextraction pose le problème des transferts résiduels des éléments traces vers les réseaux trophiques et des risques que cela peut poser, au regard des bénéfices évidents que ces méthodes peuvent apporter. À l'heure actuelle, cette problématique a très peu été explorée et doit être rapprochée des évaluations des risques à l'échelle globale des sites, abordées dans les autres ateliers.

Les perspectives

Si cette «troisième génération» d'approche de la dépollution, par traitement biologique, occupe encore une place marginale dans la boîte à outils des professionnels du secteur, nul doute que le segment est en croissance et que le marché pourrait prochainement connaître une phase de décollage. Le développement progressif, depuis ces dix dernières années, des concepts de «ressource sol» et de «services écosystémiques» pourrait rapidement entraîner une modification du paradigme et, par conséquent, conduire à un nouveau regard sur les sites et sols pollués. De passifs industriels à traiter, sources de coûts et de désagréments, les sols pollués pourraient être perçus comme des ressources à renaturer, susceptibles de trouver des fonctions et usages qui leurs sont propres. Dans ce cadre, les méthodes de traitement biologique occuperont incontestablement une place centrale.



Pour en savoir plus

[Les phytotechnologies appliquées aux sites et sols pollués. Nouveaux résultats de recherche et démonstration. ADEME, 2017](#)

[Principes et applications de l'agromine](#)

[Valoriser la biomasse produite par phytomanagement. INERIS](#)

[Sangely, M. \(2010\) – Dégradation biologique des polychlorobiphényles. Thèse Université de Toulouse](#)

[Les PCB dans les sols, comment les éliminer ? :](#)

[Vidéo Laure MALAGNOUX](#)



Atelier traitements des pollutions concentrées



Arnault PERRAULT
Colas Environnement

Véronique CROZE
ELEMENT-TERRÉ

Le constat

L'enjeu principal est d'améliorer la compréhension des phénomènes très complexes liés aux fortes concentrations pour permettre d'être plus efficace dans les dépollutions (soutien thermique, chimique, etc.). (Présentation BRGM, S. COLOMBANO)

C'est un travail qui s'effectue à la fois au laboratoire, sur site à petite échelle sous la forme de pilote mais également pendant les phases de traitement. L'étude et la maîtrise du changement d'échelle est un point clef des travaux réalisés. (Présentation Élément Terre, B. RANC)

L'expérience montre que les difficultés engendrées par le manque de connaissance des phénomènes sont surmontées plus efficacement lorsqu'il y a une bonne communication entre les acteurs et des ajustements des traitements (Présentation Solvay, T. DELLOYE).

Les lacunes

La compréhension des mécanismes a été améliorée, principalement grâce aux travaux en laboratoire. Cette compréhension reste à approfondir lors des changements d'échelle et notamment lors des traitements grandeur nature.

Les perspectives

Pour améliorer le traitement des pollutions concentrées, plusieurs axes sont à suivre :

- Amélioration de la compréhension sur des échelles plus grandes que le laboratoire : plurimétrique, site. Augmenter les retours d'expériences ou essais labo et essais sur site qui ont été réalisés
- Compréhension des effets collatéraux aux traitements nécessairement agressifs sur les pollutions concentrées (effets de la chaleur, des oxydants, etc. sur le milieu à court/moyen et long terme)
- Compréhension de la relation évolutive entre le polluant en phase pure et la matrice

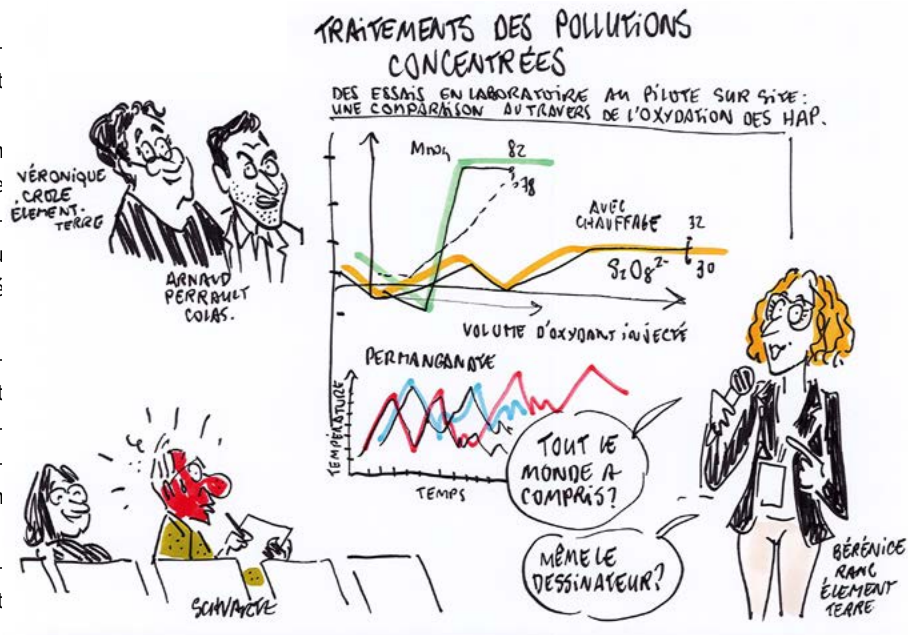
Une meilleure compréhension fine des phénomènes permettra d'améliorer les stratégies de dépollution, le dimensionnement des traitements, et ainsi réduire les délais et les coûts de ce type de dépollution.

Forum des Idées

Il a finalement eu lieu sous la forme d'un débat très libre entre les participants restants.

Les principaux sujets abordés ont été :

- L'intérêt de présenter des cas d'étude. Vraisemblablement la présentation de Solvay a été très appréciée (à juste titre)
- Tout un débat sur la notion de résilience du sol : les dépollutions « agressives » ne dénaturent-elles pas le milieu/ comment le refunctionaliser.



© Patrick A. MARTIN

Doit-on réellement dépolluer les zones sources ? Ne fait-on pas plus de mal que de bien ? Critique de la désorption thermique : doit-on vraiment dépenser toute cette énergie ? Quel est le bilan réel de l'utilisation de ces techniques vigoureuses ? Ce qui nous amène à la question des pollutions résiduelles (celles qui restent après un traitement) ou des saturation résiduelles que l'on arrive pas vraiment à traiter.

Pollution concentrée / traitement / rétrodiffusion sont les sujets qui agitent mondialement la population des SSP.

- Pollutions d'origine métalliques : peu de solutions techniques existent. Faut-il essayer de faire des développements en partant de la détermination de la forme minéralogique des métaux?

Pour en savoir plus

[Thèse Bérénice RANC](#)

[Etude ADEME – Ernst&Young 2015](#)

[Thèse Stefan COLOMBANO](#)

[“UBELL” ou pourquoi surveiller à long terme : Video Samuel WILDERMEERSCH](#)



Bilan du Forum ouvert «Prise en compte des incertitudes»

Le constat

Une vingtaine de personnes étaient présentes à ce forum ouvert et motivées pour discuter du sujet des incertitudes et de leur prise en compte dans la méthodologie de gestion des SSP.

Les conclusions se sont articulées autour de questions à investiguer et de préconisations :

- 1) Comment faire évoluer la méthodologie SSP pour permettre la présentation systématique des incertitudes dans les conclusions des rapports/documents de chacune des étapes de gestion des SSP... Prise en compte d'indice de confiance des diagnostics
- 2) Au-delà des travaux encore à réaliser pour progresser dans leur évaluation, il y a nécessité de communiquer sur l'existence des incertitudes à chacune des étapes de la gestion d'un site : de

la première caractérisation, jusqu'aux études de projet de réhabilitation et de la réception des travaux jusqu'au suivi post-traitement

3) Explorer le développement d'une méthodologie de réalisation par phases successives d'investigations en fonction de l'importance de l'hétérogénéité spatiale des variables (voir les bonnes pratiques des autres pays européens). Montrer l'intérêt de mesures itératives pour affiner le diagnostic et réduire les incertitudes

4) Lors de la préparation des échantillons avant analyse au laboratoire, il est identifié une différence entre une méthode « floue » de préparation des échantillons (variable et peu connue) et une valeur réglementaire « stricte », d'où le besoin d'être plus directs et homogènes sur la façon de préparer les échantillons.

5) L'apport de la géostatistique dans la définition des incertitudes a été longuement discuté et il semble intéressant d'exploiter les cartes d'incertitudes que la technique fournit (calculées uniquement sur le modèle et non sur le cumul des incertitudes de l'acquisition des données).

L'expérience montre que les difficultés engendrées par le manque de connaissance des phénomènes sont surmontées plus efficacement lorsqu'il y a une bonne communication entre les acteurs et des ajustements des traitements (Présentation Solvay, T DELLOYE).

Les lacunes

Lors des discussions il est apparu une certaine difficulté à communiquer de façon ouverte sur ces incertitudes. Il est par exemple ressorti de ce forum un besoin d'honnêteté intellectuelle pour intégrer et communiquer sur l'incertitude des données acquises. De façon récurrente, le fait de ne pas être certain de la justesse de la donnée obtenue est occulté par les acteurs (laboratoires, BE, mais aussi maîtres d'ouvrage, administration, etc.). Ainsi, c'est sur l'information et la communication que les efforts doivent se porter et des pistes (niveaux de confiance du schéma conceptuel) ont été proposées lors de ce forum ouvert.

Les perspectives

Les échanges entre les différents acteurs de ce forum ont abouti au consensus sur



le besoin d'un travail commun relatif à la prise en compte des incertitudes dans la gestion des SSP. Comment les identifier, les évaluer et communiquer dessus ? Pour cela il est proposé un groupe de travail national, co-piloté par l'ADEME et le BRGM, sous la tutelle du MTES. L'objectif sera d'affiner l'évaluation qualitative ou quantitative des incertitudes liées à chaque étape de gestion des SSP (échantillonnage, analyse, interprétation, communication, dimensionnement, réception de chantier, etc.). Une fois ces incertitudes identifiées, des solutions telles que des indices de confiance (similaires aux prévisions météorologiques)

pourront être travaillées. Une aide à la communication sur ces indices de confiance pourra être fournie, en s'appuyant sur des travaux déjà réalisés (par ex. COMRISK). L'aspect réglementaire sera également discuté dans ce groupe de travail.

A noter enfin que 10 participants du Forum se sont inscrits pour le Groupe de Travail qui va être lancé en 2020 pour aboutir à un guide méthodologique qui se verra très appliqué dans les 3 ans.

Pour en savoir plus

[GUYONNET D, DUBOIS D, DE FOUQUET C, GHESTEM JP, LEPROND H, ATTEIA O, COME J-M. 2019. État de l'art sur la prise en compte des notions d'incertitude dans la gestion des sites et sols pollués.](#)



Clôture des rencontres



 **Morceaux choisis**

Nathalie GUISERIX
Présidente d'Innovasol et
référente sites et sols pollués
Renault

José CAIRE
Directeur villes et territoires
durables, ADEME

“Ces rencontres ont invité à la transversalité des disciplines, pour des approches plus globales, intégrant les aspects sociétaux”

Dans l'atelier base de données et valeurs de fonds, la mise à disposition de bases de données accessibles au public témoigne d'une avancée significative dans le domaine. Dans cette perspective, le travail d'information sur la nature et le rôle d'un fonds géochimique doit se poursuivre. Sur les autres ateliers, la présentation de nombreux retours d'expériences en laboratoire et sur le terrain, y compris pour évoquer des échecs est une réussite, car ils sont toujours une source d'apprentissage précieuse. Sur le thème de la ville durable, les réflexions des bureaux d'études SSP gagneront à être enrichies d'un regard de spécialiste du changement climatique. En effet, lors de la restauration d'un site, il faudrait par exemple réussir à se projeter à 30 ans pour mieux intégrer la résilience des écosystèmes dans les paramètres. Les stands avec outils ont eu du succès, ce qui est un motif de grande satisfaction puisque l'objectif était de favoriser le transfert des innovations vers le terrain.

Certains sujets se sont révélés particulièrement dynamiques, comme celui des mousses pour le traitement ou celui sur les outils d'acquisition rapide des données. Idem pour les requalifications des friches qui ont été enrichies des études sur les fonctions et les services écosystémiques, pour une meilleure prise en compte du sol. La mise en place d'outils numériques qui facilitent l'accès aux bases de données du GIS Sol est également à souligner car les valeurs de fonds dans les sols urbains sont une clé de connaissance indispensable à la gestion des sites pollués et la revalorisation des terres excavées. L'application des résultats pratiques de la recherche se poursuit à un bon rythme, notamment sur la bio-accessibilité orale, le phyto-screening, la géostatistique appliquée, etc. Cette progression des transferts de connaissances se complète par la diffusion des états de l'art disponibles sur le site ADEME, (jardins potagers, incertitudes, mousses, services écosystémiques).

Le forum ouvert sur les incertitudes a donné lieu à plusieurs propositions :

- faire évoluer la méthodologie pour une présentation systématique des incertitudes dans les rapports et documents à chaque étape de gestion des SSP ; prendre en compte l'indice de confiance des diagnostics,
- communiquer sur l'existence de ces incertitudes aux différentes étapes de gestion, de la caractérisation jusqu'au suivi post-traitement ;
- appliquer une méthodologie de caractérisation par phases successives d'investigation, en fonction de l'hétérogénéité spatiale des variables, montrer l'intérêt de mesures itératives pour affiner le diagnostic et réduire les incertitudes.

L'ADEME est particulièrement attachée à ces rencontres nationales car elles s'inscrivent sur un temps long essentiel pour structurer un travail collectif, rythmé par des échanges formels et donnant lieu à des bilans, des préconisations et des publications. Elles sont aussi un lieu où les échanges formels et informels façonnent une communauté d'acteurs d'une grande mixité. Ce socle constitue un atout car il favorise les liens entre laboratoires, entreprises SSP et industriels, surtout lorsque ces derniers font confiance aux chercheurs et leur mettent à disposition des sites d'expérimentation. Plus qu'aux précédentes éditions, ces rencontres ont invité à la transversalité des disciplines, pour des approches plus globales, intégrant les aspects sociétaux et donnant de l'importance à la communication sur les risques et les bénéfices de la reconversion.



L'ADEME EN BREF

À l'ADEME - l'Agence de la transition écologique -, nous sommes résolument engagés dans la lutte contre le réchauffement climatique et la dégradation des ressources.

Sur tous les fronts, nous mobilisons les citoyens, les acteurs économiques et les territoires, leur donnons les moyens de progresser vers une société économe en ressources, plus sobre en carbone, plus juste et harmonieuse.

Dans tous les domaines - énergie, air, économie circulaire, alimentation, déchets, sols... - nous conseillons, facilitons et aidons au financement de nombreux projets, de la recherche jusqu'au partage des solutions.

À tous les niveaux, nous mettons nos capacités d'expertise et de prospective au service des politiques publiques.

L'ADEME est un établissement public sous la tutelle du ministère de la Transition écologique et du ministère de l'Enseignement supérieur, de la Recherche et de l'Innovation.

www.ademe.fr

 @ademe

LES COLLECTIONS DE L'ADEME



ILS L'ONT FAIT

L'ADEME catalyseur :

Les acteurs témoignent de leurs expériences et partagent leur savoir-faire.



EXPERTISES

L'ADEME expert :

Elle rend compte des résultats de recherches, études et réalisations collectives menées sous son regard.



FAITS ET CHIFFRES

L'ADEME référent :

Elle fournit des analyses objectives à partir d'indicateurs chiffrés régulièrement mis à jour.



CLÉS POUR AGIR

L'ADEME facilitateur :

Elle élabore des guides pratiques pour aider les acteurs à mettre en œuvre leurs projets de façon méthodique et/ou en conformité avec la réglementation.



HORIZONS

L'ADEME tournée vers l'avenir :

Elle propose une vision prospective et réaliste des enjeux de la transition énergétique et écologique, pour un futur désirable à construire ensemble.

SYNTHÈSE MULTIMÉDIA DES 4^{ES} RENCONTRES NATIONALES DE LA RECHERCHE SUR LES SITES ET SOLS POLLUÉS



#RencontresSSP

Les Rencontres nationales de la recherche sur les sites et sols pollués sont organisées par l'ADEME avec ses partenaires tous les 4 à 5 ans sur Paris. Elles sont l'occasion pour les acteurs de la gestion des sites et sols pollués (chercheurs, gestionnaires de sites, sociétés d'études, d'aménagement, de travaux, élus, associatifs, acteurs de la santé publique, services de l'État, etc.) et de l'économie circulaire de partager leurs expériences et de confronter leur point de vue. Les participants aux rencontres peuvent ainsi : • s'informer sur les avancées et les faits marquants de la recherche dans le domaine des sites et sols pollués sur les 5 dernières années, • et débattre sur les questions de gestion des sols, qu'ils soient urbains, industriels ou agricoles, pollués par les activités industrielles. Les recherches orientées sur les pollutions d'origine agricole et radioactives sont exclues du champ thématique de ces rencontres. Riche en contenus et débats, cet événement incontournable pour les acteurs du domaine des sites et sols pollués rassemble plus de 420 participants. Cette synthèse multimédia est destinée à un large partage pour orienter et prioriser les besoins de recherche pour la période 2020 – 2025.



ILS L'ONT FAIT

www.ademe.fr



011060

